



DAVID AMARAL MIRANDA DA SILVA

LICENCIADO

Modelação Estocástica do Depósito Mineral do Zambujal (Mina de Neves-Corvo): Contribuição da Densidade como Indicador Morfológico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida,
Prof. Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo do Carmo de Sá Caetano (FCT-UNL)

Vogais: Prof. Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa (IST-UL)

Prof. Doutor José António de Almeida (FCT-UNL)



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2015

MODELAÇÃO ESTOCÁSTICA DO DEPÓSITO MINERAL DO ZAMBUJAL (MINA DE NEVES-CORVO): CONTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE COMO INDICADOR MORFOLÓGICO

Copyright em nome de David Amaral Miranda da Silva, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Concluída esta dissertação, desejo em curtas palavras manifestar o meu agradecimento às pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Doutor José António de Almeida a quem devo um profundo agradecimento pelo profissionalismo que manifestou na sua dedicação e disponibilidade ao longo da construção do trabalho, no apoio e incentivo em momentos de dúvidas e hesitações, na capacidade de transmissão do saber, na generosidade em dar sempre mais, em sugerir, propor, corrigir, aconselhar... o meu muito obrigado por tudo.

À empresa *Lundin Mining*, pela cedência dos dados que permitiram a realização deste estudo. Em particular ao Doutor Nelson Pacheco, que foi o meu contacto, os meus sinceros agradecimentos por toda a ajuda e disponibilidade.

À empresa *Midland Valley* por ter celebrado um protocolo de utilização de licenças educacionais do *software Move®* com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A todos os que fizeram parte do meu percurso académico. Aos docentes do Departamento de Ciências da Terra pela transmissão de conhecimentos durante estes anos, por todo o apoio, disponibilidade e simpatia. Aos meus colegas, pela colaboração e espírito de entreajuda, por todas as conversas saudáveis, gargalhadas, momentos de boa disposição e cumplicidade. De um modo particular, um especial agradecimento ao Raúl Conceição, ao João Miranda, à Yucânia Cruz, à Rita Ferreira, à Soraia Botelho, à Ana Ramada, à Mariana Pinto, à Catarina Fernandes e ao João Ferreira. Muito obrigado por todas as boas memórias que para sempre irão ficar.

Aos meus amigos que percorreram a meu lado esta importante etapa. Em especial ao Rodrigo Cotrim, ao Francisco Duarte e ao João Silva, são a família que eu escolhi. A todos os outros que estiveram presentes, um muito obrigado.

À Catarina Guerreiro por fazer parte da minha vida. Por ter estado presente com o seu espírito positivo nos bons e maus momentos. Por todo o afeto e preocupação. Pelos ótimos conselhos e constante apoio. Pela sua força genuína que me acalentou e me transmitiu a confiança para continuar, sempre.

À minha família a quem dedico a minha dissertação. Agradeço por todos os valores que me passaram, por acreditarem em mim e por me fazerem acreditar, por me encorajarem a chegar onde cheguei. Em especial à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão Afonso, o meu muito obrigado, para sempre.

A todos o meu profundo e sincero agradecimento.

*A espantosa realidade das cousas
É a minha descoberta de todos os dias.
Cada cousa é o que é,
E é difícil explicar a alguém quanto isso me alegra,
E quanto isso me basta.*

- Fernando Pessoa

RESUMO

Este estudo tem como objetivo construir um modelo estocástico de alta resolução da morfologia e dos teores em metal, do depósito mineral do Zambujal, Mina de Neves-Corvo. O depósito do Zambujal é um corpo vulcanogénico que se localiza no setor Português, na parte mais a Sul da Faixa Piritosa Ibérica, com sulfuretos maciços no topo e fissurais na base.

Para construir um modelo estocástico deste depósito, onde os teores em metal evidenciam zonamento, é importante ter em conta a proporção local de sulfuretos na matriz rochosa. Como esta variável não é quantificada em laboratório, propõe-se a utilização da densidade das amostras como um indicador indireto da proporção de minérios na matriz rochosa. Conhecida esta variável, a modelação dos teores em metal pode ser feita para os chamados teores relativos (teores em metal na fração de sulfuretos).

As principais etapas da metodologia proposta são: (a) para cada amostra analisada no laboratório, estimação de soluções para a variável proporção de sulfuretos na matriz rochosa $P(x)$, tendo em conta a paragénese principal do depósito, os teores e a densidade da rocha; (b) construção de um modelo morfológico 3D de baixa resolução com duas regiões, minérios maciços e minérios fissurais, por digitalização de limites em perfis, interpolação de superfícies e conversão para o modelo de blocos do depósito; (c) construção de um modelo morfológico 3D de alta resolução para todo o depósito da variável $P(x)$ por Simulação Sequencial Direta (SSD), tendo como informação condicionante os histogramas regionais de $P(x)$ para minérios maciços e minérios fissurais e as soluções obtidas em (a) para $P(x)$ na localização das sondagens; (d) SSD dos teores relativos em cobre, zinco e prata; (e) discussão dos resultados e quantificação de recursos.

Os resultados foram validados por comparação com os equivalentes obtidos numa estimação por krigagem normal dos teores em metal e mostraram ser da mesma ordem de grandeza. O conjunto de imagens simuladas das variáveis $P(x)$ e teores permite quantificar a incerteza do conhecimento do depósito relativamente à informação disponível.

Palavras-chave: Mina de Neves-Corvo; depósito do Zambujal; proporção de sulfuretos na matriz rochosa; simulação geoestatística; modelo morfológico; modelo de teores em metal.

ABSTRACT

The aim of this study is to build a high-resolution stochastic model of the morphology and metal grades of the Zambujal ore deposit, Neves–Corvo mine. Zambujal is a volcanogenic massive sulfide ore deposit located in the southern Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt that presents a massive ore at the top and fissural ores at the bottom.

To build a model in such type of deposit, where the metal grades show significant zoning by ore types, it is important to take into account the local proportion of ore sulfides within the rock matrix. As the local proportion of ore sulfides to the waste rock is not measured in laboratory, in this work it is proposed the use of the rock density as a proxy of the sulfide proportion within the rock matrix. If this proportion is quantified, the modeling of grades can be made to the so called relative ore grades (meaning metal grades divided by the proportion of ore sulfides to the waste rock)

The proposed methodology encompasses the main steps: (a) for each borehole sample, the evaluation of possible solutions for the proportion of sulfide minerals $P(x)$, taking into account the main minerals of the Zambujal paragenesis, the measured grades and the rock density; (b) the building of a 3D low-resolution two regions morphological model of the deposit (massive and fissural ores), by digitalization of the boundaries, interpolation of surfaces, and conversion into a block model; (c) the building of a high-resolution morphological model of the $P(x)$ variable for the entire deposit by direct sequential simulation (DSS), conditioned to the regional histograms of $P(x)$, to the massive ores and fissural ores and to the borehole $P(x)$ data obtained in (a); (d) the DSS of relative metal grades for copper, zinc and silver; (e) the discussion of results and quantification of resources.

The results are validated by comparing the estimates of global metal resources obtained using this methodology with those obtained by ordinary kriging, with the two sets of results shown to be similar. The sets of the simulated images of $P(x)$ and metal grades variables enable to quantify the uncertainty of the model relatively to the available information.

Key-Words: Neves-Corvo mine; Zambujal ore deposit; sulfide proportion within the rock matrix; geostatistical simulation; morphological model; metal grades model.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e Objetivos do Estudo.....	1
1.2 Organização da Tese	3
2. ENQUADRAMENTO DA MINA DE NEVES CORVO	5
2.1 O Projeto da Mina de Neves-Corvo	5
2.2 Enquadramento Geológico Regional	6
2.2.1 Terreno Sul Português	6
2.2.2 Faixa Piritosa Ibérica	7
2.3 Enquadramento Geológico Local	8
2.3.1 A Mina de Neves-Corvo	8
2.3.2 Sequência estratigráfica da área da Mina de Neves-Corvo.....	9
2.4 Metalogénese e Mineralizações	10
2.5 O Depósito do Zambujal.....	12
3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
3.1 Estado da Arte	15
3.2 Metodologia	17
3.2.1 Análise estatística univariada, bivariada e multivariada.....	19
3.2.2 Estimação da variável $P(x)$ proporção de sulfuretos na matriz rochosa nas amostras retiradas das sondagens	19
3.2.3 Georreferenciação das observações e regularização para espaçamento constante ...	21
3.2.4 Modelo morfológico 3D de baixa resolução do depósito do Zambujal.....	21
3.2.5 Estimação por krigagem normal dos teores em metal e das variáveis $P(x)$ e $D(x)$ para validação do modelo de teores relativos	22
3.2.6 Modelo morfológico de alta resolução da variável $P(x)$	22
3.2.7 Cálculo das variáveis auxiliares teores relativos e simulação destas variáveis	23
3.2.8 Validação e apresentação dos resultados	24
3.3 Fundamentos Teóricos da Geoestatística.....	25
3.3.1 Variografia	25

3.3.2	O estimador geoestatístico de krigagem	26
3.3.3	Simulação geoestatística e simulação sequencial direta	26
3.3.4	Simulação por campos de probabilidade	27
3.3.5	Quantificação da incerteza	28
4.	CASO DE ESTUDO	29
4.1	Análise Estatística Univariada, Bivariada e Multivariada	29
4.1.1	Descrição dos dados de partida	29
4.1.2	Análise univariada	30
4.1.3	Análise bivariada	33
4.1.4	Análise multivariada (ACP).....	34
4.2	Modelo Morfológico de Baixa Resolução	36
4.2.1	Seleção de perfis e digitalização dos limites da mineralização nos perfis selecionados..	37
4.2.2	Interpolação para a construção dos sólidos 3D	37
4.2.3	Conversão para um modelo de blocos.....	39
4.3	Geração da Lei de Distribuição da Variável $P(x)$ nas Sondagens	39
4.4	Variografia e Ajuste de Modelos Teóricos.....	43
4.5	Estimação por Krigagem Normal dos Valores Médios para o Depósito de Todas as Variáveis Estudadas	49
4.6	Modelo Morfológico da Variável Proporção de Sulfuretos (Modelo de Alta Resolução)	52
4.6.1	Simulação dos valores de $P(x)$ na localização das sondagens	52
4.6.2	Simulação dos valores de $P(x)$ para o depósito do Zambujal.....	53
4.7	Modelo de Teores Relativos.....	55
4.8	Análise Comparativa de Resultados e Discussão.....	57
4.9	Classificação e Avaliação de Recursos	61
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Localização da zona de estudo - Carta Militar 1:50 000 Beja, 46-3 Almodôvar (adaptado de www.igeoe.pt).	5
Figura 2.2 Mapa geológico esquemático da Zona Sul Portuguesa, indicando principais jazigos (Dias et al., 2011, adapt. Oliveira, 1990; Barriga et al., 1997; Oliveira et al., 1998a,b, 2001; Carvalho et al., 1999; Leistel et al., 1998; Rosa et al., 2001; Matos et al., 2000, 2003a).	7
Figura 2.3 Ilustração da geologia da FPI (adaptado de Oliveira, 1990 e Leistel et al., 1998).	8
Figura 2.4 Sequência estratigráfica da área da Mina de Neves-Corvo (adaptado de Oliveira et al., 1997).	9
Figura 2.5 – Localização das massas mineralizadas em planta, e indicação do tipo de minério e zonalidade metálica; o depósito do Zambujal está destacado a cor vermelha (adaptado de Carvalho & Ferreira, 1994).	13
Figura 2.6 – Perfil geológico do depósito do Zambujal, Mina de Neves-Corvo (adaptado de Carvalho & Ferreira, 1994).	13
Figura 3.1 Fluxograma da metodologia proposta neste estudo para modelação do depósito do Zambujal.	18
Figura 3.2 Representação de um troço de sondagem, com informação das coordenadas da boca do furo e fórmulas trigonométricas utilizadas na georreferenciação das várias amostras ao longo da sondagem.	21
Figura 4.1 Representação tridimensional da malha de sondagens de superfície e de fundo, no depósito do Zambujal.	30
Figura 4.2 Histogramas dos dados originais: valores de densidade; teores medidos de cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo.	31
Figura 4.3 Matriz de diagramas de dispersão entre as variáveis densidade, cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo.	33
Figura 4.4 Gráficos ACP com representação das correlações entre as variáveis densidade, cobre, zinco, enxofre, ferro e chumbo e as componentes principais F1/F2 e F1/F3.	35
Figura 4.5 Gráficos ACP com a projeção das observações por tipo de minério maciço ou minério fissural nas componentes principais F1/F2 e F1/F3.	36
Figura 4.6 Fase de digitalização em perfil intermédio dos limites das regiões R_M (maciço no topo) e R_F (fissural na base) utilizando dados das sondagens de prospeção e avaliação. Os troços de sondagem a vermelho assinalam minérios maciços e a azul os minérios fissurais.	38

Figura 4.7 Representação 3D das superfícies que delimitam o topo e base das regiões R_M e R_F : superfície do topo do minério maciço (vermelho), superfície de transição do minério maciço para o minério fissural (amarelo) e superfície da base do minério fissural (azul).	38
Figura 4.8 Representação matricial do modelo morfológico de baixa resolução com o minério maciço no topo (vermelho) e os minérios fissurais na base (azul).	39
Figura 4.9 Histograma de frequências relativas dos valores calculados de $P(x)$ onde são observadas duas populações de observações.	41
Figura 4.10 Histogramas cumulativos condicionais de $P(x)$ por tipo de minério, maciço e fissural.	41
Figura 4.11 Representação da variável $P(x)$, densidade $D(x)$ e teores de cobre e zinco em função da cota para a sondagem SN18B.	42
Figura 4.12 Histograma de frequências absolutas das diferenças entre os máximos e mínimos das 10 soluções de $P(x)$ geradas em cada amostra.	43
Figura 4.13 Variogramas experimentais da variável $P(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	44
Figura 4.14 Variogramas experimentais da variável $D(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	45
Figura 4.15 Variogramas experimentais do teor de cobre $Z_{Cu}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	45
Figura 4.16 Variogramas experimentais do teor de zinco $Z_{Zn}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	46
Figura 4.17 Variogramas experimentais do teor de prata $Z_{Ag}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	46
Figura 4.18 Variogramas experimentais do teor relativo de cobre $Y_{Cu}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	47
Figura 4.19 Variogramas experimentais do teor relativo de zinco $Y_{Zn}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	47
Figura 4.20 Variogramas experimentais do teor relativo de prata $Y_{Ag}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).	48
Figura 4.21 Representação 3D de uma realização de $P(x)$ na localização das sondagens, convertida para a malha de blocos. Cores quentes indicam valores de $P(x)$ elevados – minérios maciços – e cores frias indicam valores de $P(x)$ mais baixos – minérios fissurais. A superfície representa a base do minério fissural.	52
Figura 4.22 Representação dos valores de uma realização de $P(x)$ numa secção vertical (2D).	53
Figura 4.23 Representação 3D da média das 30 realizações da variável $P(x)$ obtidas por SSD.	53

Figura 4.24 Representação 3D do modelo de incerteza de $P(x)$ associado às 30 realizações. Visualização dos 10% de blocos com menor incerteza na avaliação de $P(x)$	54
Figura 4.25 Representação 3D da média das 90 simulações do teor relativo de cobre $Y_{Cu}(x)$	56
Figura 4.26 Representação 3D da média das 90 simulações do teor de cobre $Z_{Cu}(x)$	56
Figura 4.27 Representação 3D da incerteza local de $Y_{Cu}(x)$ calculada pela variância local, estão representados os 30% de blocos com menor variância, ou seja, menor incerteza.	57
Figura 4.28 Representação em secção do modelo morfológico binário, média das simulações de $P(x)$ e média das simulações dos teores de cobre $Z_{Cu}(x)$, zinco $Z_{Zn}(x)$ e prata $Z_{Ag}(x)$	58
Figura 4.29 Representação em secção do modelo morfológico binário, média das simulações de $P(x)$ e média das simulações dos teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$, zinco $Y_{Zn}(x)$ e prata $Y_{Ag}(x)$	59
Figura 4.30 Representação em secção do modelo morfológico binário, variância local das simulações de $P(x)$ e variância local das simulações dos teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$, zinco $Y_{Zn}(x)$ e prata $Y_{Ag}(x)$	60
Figura 4.31 Apresentação das curvas de recursos do cobre em função do teor de cobre. Comparação dos cenários otimista, médio e pessimista resultante do máximo, média a mínimo de todas as curvas e indicação do recurso total de cobre calculado por KN.	62
Figura 4.32 Variação do volume total de minério (sulfuretos) e dos volumes desagregados em maciço e fissural em função do teor de cobre.	63
Figura 4.33 Quantidades de minério de cobre em função da variação do teor de corte e da proporção de sulfuretos $P(x)$. A quantidade de recurso aumenta das cores frias para as cores quentes. ...	64
Figura 4.34 Variação dos recursos de cobre com a alteração do teor de corte da mina conforme as retas representadas no gráfico da figura 4.33. Representação dos quantitativos para o cenário otimista, médio e pessimista.	65

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tipos de mineralização e de minério; fissural é a designação adotada para a mineralização do tipo <i>stockwork</i>	11
Tabela 4.1 – Estatísticos básicos das variáveis densidade, cobre, zinco, ferro, enxofre, chumbo e prata conforme medidos nos suportes originais.....	32
Tabela 4.2 – Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson (a azul) e Spearman (a preto).	34
Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos da malha de blocos de avaliação: coordenadas dos blocos início e fim, dimensão do bloco e número de blocos nas três direções ortogonais.	39
Tabela 4.4 – Minerais principais (sulfuretos) do depósito do Zambujal, densidade e percentagem de metal conforme a fórmula química e os pesos atômicos dos elementos envolvidos.	40
. Tabela 4.5 – Tabela síntese dos parâmetros teóricos dos modelos de variogramas ajustados.	48
Tabela 4.6 – Síntese dos resultados obtidos relativamente à quantidade de minério (volume e tonelagem) e quantidades de metal obtidas pela estimação de teores e estimação de teores relativos por krigagem normal (KN). Os resultados são apresentados separados por região R_M , R_F e $R_M + R_F$	50
Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da variável $P(x)$ obtidos por KN com os obtidos por SSD nas regiões R_M e R_F	54
Tabela 4.8 – Comparação dos resultados dos teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$ obtidos por KN com aqueles obtidos por SSD, nas regiões R_M e R_F	55
Tabela 4.9 – Tabela síntese das variações nos recursos de cobre aquando da alteração do teor de corte em +0,1%, +0,2%, +0,3% e -0,1%, -0,2%, -0,3%.	65

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DO ESTUDO

Portugal explora atualmente minérios de cobre e zinco em depósitos de sulfuretos na Faixa Piritosa Ibérica (FPI), nomeadamente na Mina de Neves-Corvo, cujos dados foram utilizados neste trabalho. Os sulfuretos formam uma importante classe de minerais onde estão incluídos a maioria dos minérios. A fórmula geral para os sulfuretos é X_mZ_n , em que o X representa o elemento metálico e Z o elemento enxofre (não-metálico) (Klein et al., 1993).

Os minérios explorados podem ser agrupados em diferentes tipos de mineralizações, conforme o contexto geológico da sua génese. Os jazigos vulcanogénicos de sulfuretos maciços caracterizam-se pela sua formação em zonas próximas dos fundos marinhos, onde geralmente se observam mineralizações do tipo *stockwork* nas zonas subjacentes ao minério maciço (Tornos, 2006). As elevadas quantidades de sulfuretos maciços e minério tipo *stockwork* (ou minério fissural) fazem da FPI o local na crosta terrestre com a maior concentração de sulfuretos. O minério fissural penetra até mais abaixo na sequência, podendo observar-se a transição do minério fissural até se atingir os sulfuretos maciços (Silva et al., 1997). Barriga (1990) e Carvalho et al. (1999) afirmam que os sulfuretos maciços na FPI terão sido formados subjacentemente a uma camada de chert que, por um lado, permitia a precipitação de elementos metálicos e, por outro, impedia a oxidação e dispersão dessa mineralização. Mais recentemente, Relvas (2000) propõe um modelo distinto para o depósito de Neves-Corvo, descrevendo que a formação dos sulfuretos maciços deu-se pela conjugação de vários processos, tais como, deposição por substituição na subsuperfície, exalação de fluídos e rearranjo sedimentar. Evidências texturais a todas as escalas demonstram que os mecanismos de substituição massiva nas rochas vulcânicas coerentes das sequências a muro das massas mineralizadas e de substituição disseminada nas unidades sedimentares e vulcanoclásticas foram determinantes na formação das mineralizações na FPI (Relvas, 2014).

O cobre (Cu) na crosta terrestre apresenta um teor médio ou *clark* de 58 ppm. Em termos económicos, o grupo dos depósitos de sulfuretos maciços constituem uma importante fonte de cobre. Metais como o ouro (Au) e a prata (Ag) elevam o valor do minério de cobre como metais secundários. Por outro lado, elementos como o arsénio (As), chumbo (Pb) e antimónio (Sb) acarretam dificuldades durante o processamento do minério (Dill, 2008) e desvalorizam o valor do concentrado (penalizantes). O cobre destaca-se pelas suas propriedades físico-químicas, alta ductilidade, alta condutividade térmica e elétrica e alta resistência à corrosão. Em contexto de geologia económica, o zinco (Zn), prata (Ag) e índio (In) são semelhantes, porque ocorrem habitualmente nos mesmos depósitos e sob as mesmas formas. O teor médio da prata na crosta terrestre é de apenas 0,08 ppm, estando este metal precioso presente em vários tipos de depósitos. Em raras circunstâncias, o índio (In) ocorre na natureza no seu estado nativo, porém, na maioria dos casos ocorre associado ao enxofre (S). Na esfalerite, com fórmula química ZnS , é comum o zinco ser substituído por índio ou ferro na estrutura deste mineral (Dill, 2008). Geralmente o índio possui uma boa correlação com altos teores de cobre e zinco. Este elemento tende a ocorrer associado a metais de cobre, zinco, prata e estanho (Schwarz-Schampera & Herzing, 2002),

sendo que as maiores concentrações de índio ocorrem em depósitos de sulfuretos cupríferos e estaníferos.

Os modelos geológicos tridimensionais e os modelos de teores são ferramentas fundamentais no contexto da indústria mineira. Ambos são gerados e atualizados com toda a informação geológica e geoquímica reunida durante a prospeção nas diferentes fases do projeto mineiro. Esta informação é utilizada, tanto na compreensão da génese do depósito mineral, como na construção de modelos da distribuição espacial dos diferentes tipos de minério e teores (Rossi & Deutsch, 2014).

Este trabalho tem como finalidade a construção de um modelo tridimensional da morfologia e dos teores do depósito do Zambujal, um dos depósitos em fase de exploração na Mina de Neves-Corvo (Relvas et al., 2002). Trata-se de um depósito mineral do tipo vulcanogénico, situado no sector português da FPI, que apresenta um corpo de sulfuretos maciços no topo e minério do tipo fissural na base.

A título meramente informativo, refira-se que para a avaliação das reservas em Neves-Corvo em 2014, os teores de corte médios utilizados foram 1,6% e 4,8% respetivamente para o cobre e o zinco. Estes teores de corte poderão ser reajustados, em baixa, em função da proporção de minérios e de rocha encaixante, porque a recuperação em lavaria dos minérios de cobre e zinco para teores equivalentes é maior para minérios com maior quantidade de rocha encaixante.

Os resultados obtidos foram validados pela comparação dos recursos globais em metal obtidos com a metodologia proposta (simulação da proporção de sulfuretos na matriz e teores relativos) com os estimados através do estimador de krigagem normal (KN), que devem ser quase iguais quando avaliados para todo o depósito. As imagens simuladas das variáveis em estudo, proporções e teores de metal, quantificam a incerteza local face à informação disponível, tendo em conta a distância às amostras mais próximas, a continuidade espacial e a heterogeneidade local dos resultados das análises de teores e densidade da rocha (Caers, 2011; Charifo et al., 2013)

Para a modelação e visualização tridimensional dos resultados recorreu-se ao *software* Move™ da *Midland Valley*, ao abrigo de um protocolo de utilização educacional com a FCT-UNL. A simulação geoestatística recorreu ao código das versões paralelizadas de simulação sequencial propostas por Nunes e Almeida, 2010. O cálculo de variogramas e ajustamento de modelos foi feito no *software* geoMS e para os estatísticos univariados, bivariados e multivariados utilizaram-se os programas Excel® e R®.

A Somincor – Sociedade Mineira de Neves-Corvo, SA foi fundada a 24 julho de 1980, após a descoberta de um depósito de sulfuretos maciços no bordo sul da FPI com quantidades significativas de cobre e zinco. Atualmente, a Mina de Neves-Corvo é operada pela Somincor, que é uma empresa subsidiária da multinacional *Lundin Mining*. A disponibilização da base de dados do depósito do Zambujal foi imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo é exposto o enquadramento e os objetivos do estudo. No segundo capítulo caracteriza-se a região em estudo, do ponto de vista geográfico e geológico e descrevem-se os aspetos mais relevantes para o entendimento da problemática abordada.

O capítulo três inicia-se com a descrição do estado da arte da modelação geoestatística deste tipo de depósitos minerais, onde se faz referência a trabalhos já desenvolvidos neste âmbito. De seguida, descreve-se a metodologia e apresentam-se os fundamentos teóricos dos métodos utilizados.

No quarto capítulo são descritos todos os procedimentos experimentais relativos à modelação tridimensional do depósito do Zambujal, incluindo a morfologia e os teores em metal. São interpretadas e comentadas as imagens, tabelas e gráficos dos resultados obtidos no desenvolvimento de todas as etapas.

No capítulo cinco apresentam-se comentários finais relativos à metodologia proposta nesta dissertação. Finalmente, no sexto capítulo apresentam-se as referências bibliográficas.

2. ENQUADRAMENTO DA MINA DE NEVES CORVO

2.1 O PROJETO DA MINA DE NEVES-CORVO

O projeto da mina de Neves-Corvo está instalado no Baixo Alentejo (NUT III), a cerca de 220 km a sudeste de Lisboa, na orla ocidental da FPI. Ocupa a área aproximada de 485 ha nos concelhos de Castro Verde e Almodôvar (Figura 2.1), nas freguesias de Santa Bárbara de Padrões e Senhora da Graça de Padrões, respetivamente. O Complexo é limitado a Norte pela povoação do Lombador e a Sul pela povoação de Semblana; ocupa parte das cartas militares, folhas nºs 556 e 557 à escala 1/25 000, que compõem a carta corográfica à escala 1/ 50 000 46-C (IGeoE).

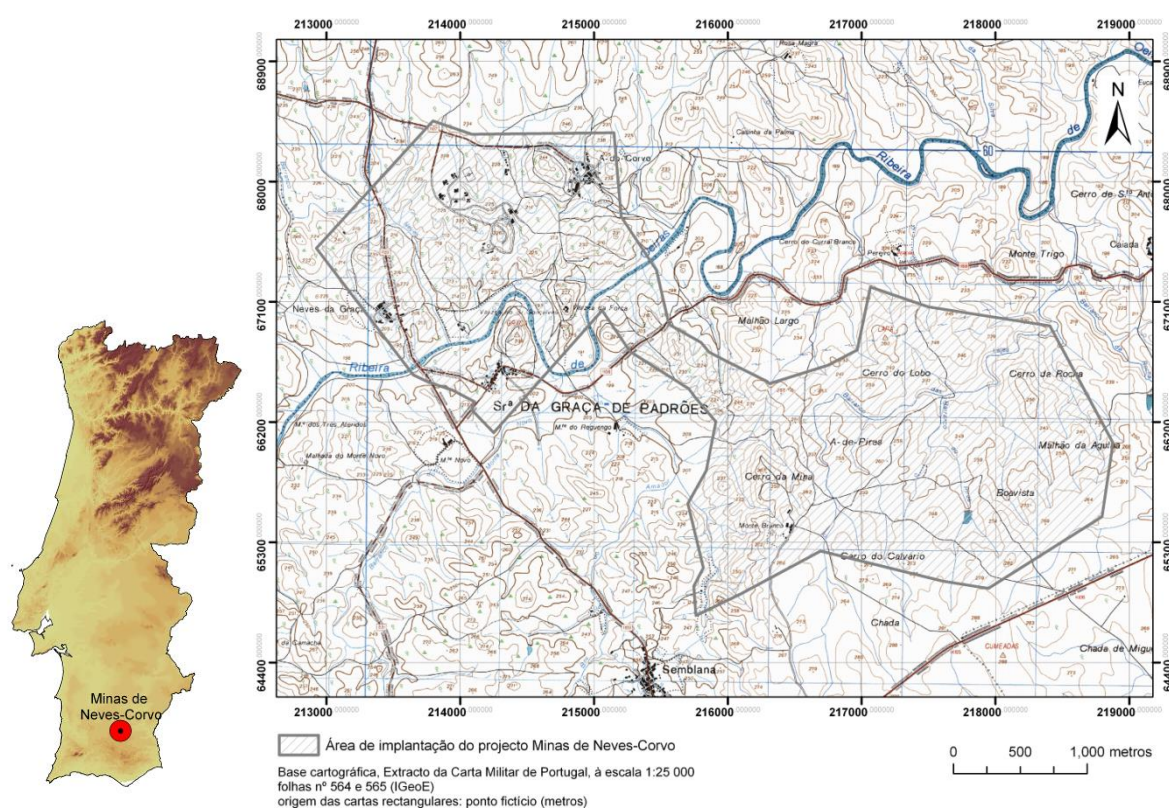


Figura 2.1 – Localização da zona de estudo - Carta Militar 1:50 000 Beja, 46-3 Almodôvar (adaptado de www.igeoe.pt).

O acesso ao Complexo Mineiro é feito pela Estrada Nacional 2 – que liga Castro Verde ao Sul, passando por Almodôvar – e depois por uma estrada municipal. O IC1, que passa por Castro Verde, permite estabelecer a ligação para Norte aos centros urbanos mais próximos de Beja e de Évora e para Sul a Ourique. Permite ainda a ligação próxima à Autoestrada do Sul – A2. Um ramal ferroviário liga o Complexo Mineiro à rede ferroviária nacional, com ligação à Linha do Alentejo, a Norte de Ourique.

A empresa que faz a exploração do Complexo Mineiro é a Sociedade Mineira de Neves-Corvo, SA (Somincor), e tem o seu capital integralmente subscrito e realizado. Presentemente, a Somincor faz

parte do grupo *Lundin Mining Corporation*, com sede social em Vancouver, Canadá e administração executiva em Estocolmo, Suécia.

O Complexo Mineiro de Neves-Corvo começou a ser desenvolvido na década de 1980, logo após a descoberta em 1977 de um jazigo de sulfuretos com teores elevados de cobre, zinco, chumbo e prata. O primeiro minério de cobre foi extraído e concentrado em Novembro de 1988. A mina de Neves-Corvo é o maior e o mais importante projeto português da indústria mineira, cuja construção e operação se destacam a nível mundial, não só pela sua dimensão como também pelo seu avançado conteúdo tecnológico.

2.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Maciço Hespérico representa o segmento mais ocidental do Varisco europeu, com o qual enlaça através da abertura do golfo da Biscaia, entre 110 e 75 Ma. Encontra-se separado do Varisco de Marrocos e dos Apalaches pela Cadeia Bético-Rifenha e pela abertura do Atlântico, respetivamente. Considera-se um setor chave na estruturação dos orógenos paleozoicos peri-atlânticos (Dias et al., 2011).

Quanto ao zonamento do Varisco Ibérico transversalmente às estruturas, distingue-se uma série de unidades, de E e NE, para W e SW (Ribeiro, 2013) (figura 2.2):

Terreno Ibérico (TI):

Zona Cantábrica (ZC)

Zona Astur-ocidental Leonesa (ZAOL)

Zona Centro-Ibérica (ZCI)

Zona de Ossa-Morena (ZOM)

Terreno Sul Português (TSP)

Terrenos Exóticos, carreados sobre os anteriores:

Terreno Continental Alóctone (TCA) e Terreno Ofiolítico do NW Ibérico (TON), a NW

Terreno Finisterra (TF) a SW

Visto que a FPI está localizada no Terreno Sul Português (TSP), este breve enquadramento regional vai incidir essencialmente nesta zona.

2.2.1 TERRENO SUL PORTUGUÊS

O Terreno Sul Português representa a zona SW do Varisco Ibérico (figura 2.2). No Terreno Sul Português são identificados os domínios Pulo do Lobo, FPI (ver subcapítulo 2.2.2.), Grupo do Flysh do Baixo Alentejo e Setor Sudoeste. Durante um longo período de tempo, os geólogos focaram-se

principalmente no estudo da zona central do Terreno Sul Português, a FPI, pelo facto de existirem importantes recursos de sulfuretos maciços polimetálicos (Oliveira, 1983).

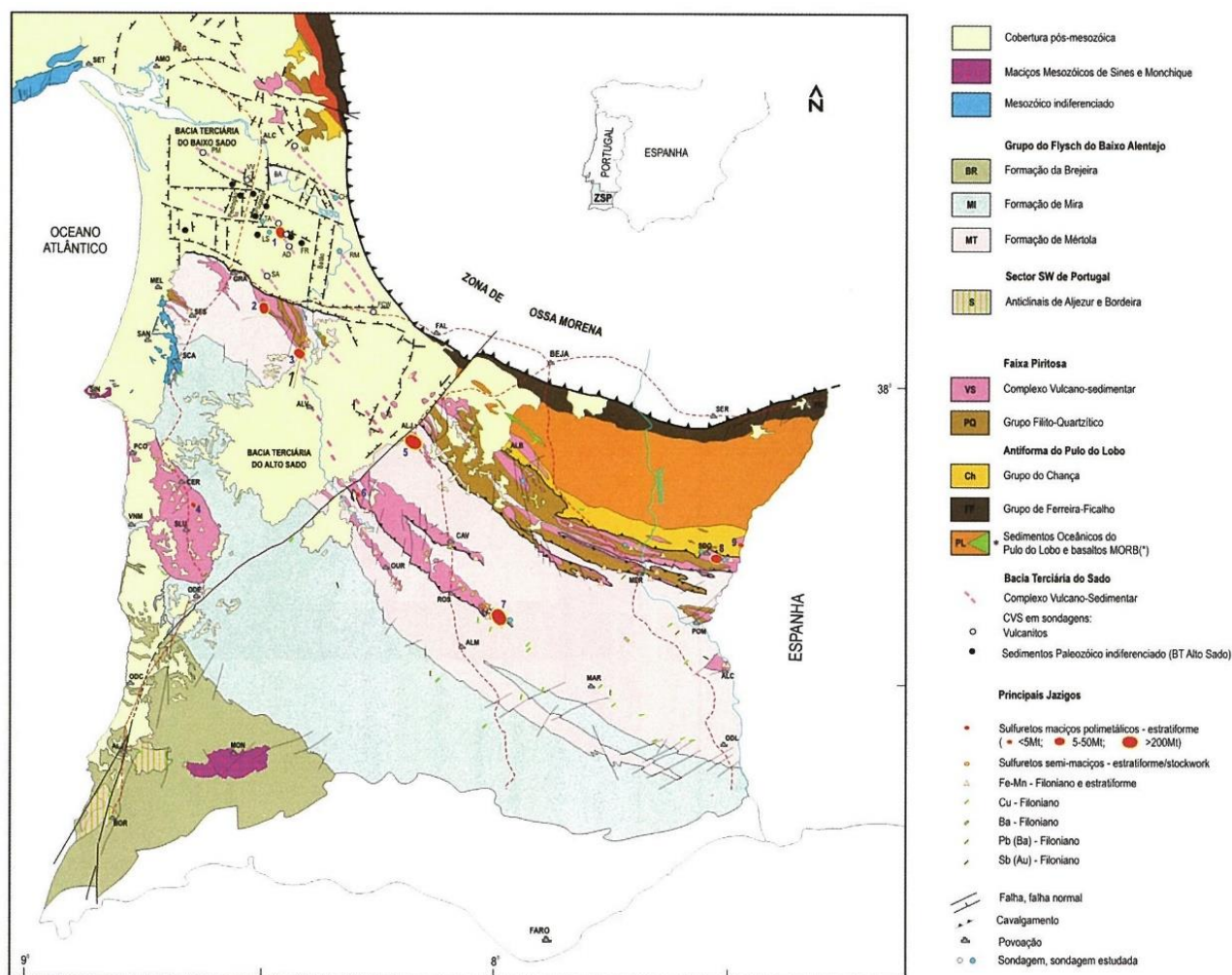


Figura 2.2 Mapa geológico esquemático da Zona Sul Portuguesa, indicando principais jazigos (Dias et al., 2011, adapt. Oliveira, 1990; Barriga et al., 1997; Oliveira et al., 1998a,b, 2001; Carvalho et al., 1999; Leistel et al., 1998; Rosa et al., 2001; Matos et al., 2000, 2003a).

2.2.2 FAIXA PIRITOSA IBÉRICA

Na zona mais a SW distingue-se, de NE para SW, a FPI que compreende sedimentos do Devónico Superior recobertos por um complexo vulcano-silicioso do Devónico superior a Carbónico inferior e finalmente por um *flysch* do Carbónico inferior que se vai tornando mais recente para SW.

O magmatismo bimodal da FPI é devido a um regime transtensivo a transpressivo por colisão oblíqua entre os Terrenos Ibérico e Sul Português, com partição de deformação concentrada no domínio magmático da FPI (Dias et al., 2011).

Os resultados alcançados no complexo vulcânico da Mina de Neves-Corvo, relativos ao estudo da arquitetura da fácies vulcânica aplicado aos complexos vulcânicos da FPI, têm-se verificado relevantes.

A investigação geoquímica das massas mineralizadas de sulfuretos maciços tem vindo a aprofundar-se ao longo do tempo (Dias et al., 2011).

Em termos da estratigrafia das unidades integradas na FPI pode referir-se que o Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS) está posicionado entre o Grupo Filito-Quartzítico (PQ) e a Formação de Mértola do Grupo *Flysh* do Baixo Alentejo (GFBA) (figura 2.3). Encontra-se uma descrição destas unidades no subcapítulo 2.3.2 da dissertação. Em termos regionais (figura 2.4), a FPI divide-se em dois ramos principais (Oliveira, 1990): um Ramo Sul, com estruturas tectónicas anticlinórias enraizadas, onde a sucessão estratigráfica PQ/CVS/GFBA se mantém na sua ordem normal ou afetadas por cavalgamentos restritos aos flancos inversos das dobras, e um Ramo Norte onde o par PQ/CVS aparece sistematicamente sobreposto por escamas tectónicas envolvendo quartzitos e xistos do PQ e rochas vulcanoclásticas finas do CVS.

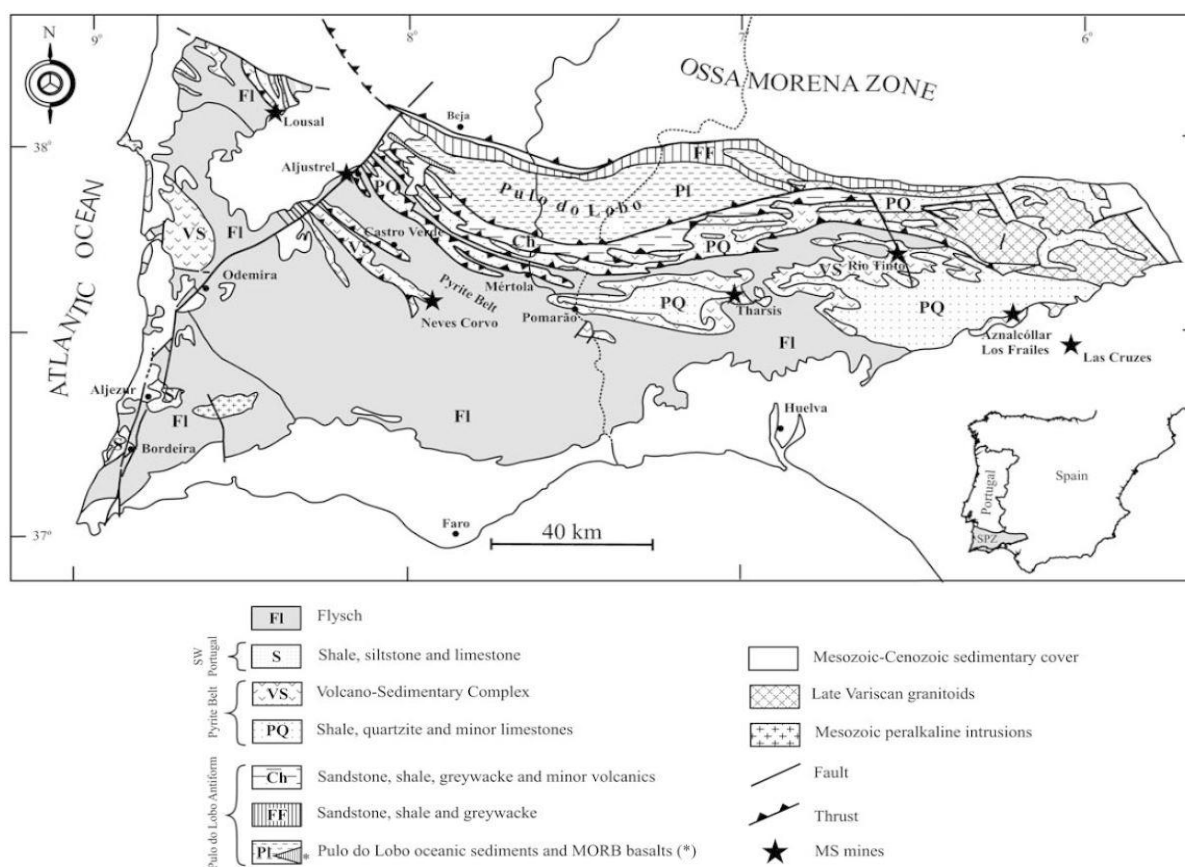


Figura 2.3 Ilustração da geologia da FPI (adaptado de Oliveira, 1990 e Leistel et al., 1998).

2.3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO LOCAL

2.3.1 A MINA DE NEVES-CORVO

A descoberta do jazigo de Neves-Corvo em 1977 foi marcada pelo conteúdo metálico das suas mineralizações, em especial os teores elevados em cobre, zinco e estanho e a dimensão do vasto recurso geológico-mineiro. A informação atual sobre a geologia, estrutura e mineralogia do jazigo é apresentada como um referencial na evolução do conhecimento adquirido e uma contribuição para a

definição do seu modelo metalogénico (Carvalho & Ferreira, 1994). Até à data foram reconhecidas seis corpos mineralizados (Neves, Corvo, Graça, Zambujal, Lombador e Semblana), todos situados em ambos os flancos do anticlinal do Rosário/Neves-Corvo e com orientação NW-SE.

Os corpos mineralizados do depósito de sulfuretos maciços de Neves-Corvo apresentam forma lenticular. A estratigrafia do Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS), que acolhe os sulfuretos maciços, descrita por Albouy et al. (1981), consiste numa unidade inferior composta por tufos vulcânicos félsicos, sobreposta por uma unidade de xistos negros e pela camada de sulfuretos maciços. Todas as unidades referidas encontram-se em concordância estratigráfica (Leca et al., 1983). A sucessão litológica está dividida em duas sequências tectono-estratigráficas principais (Carvalho & Ferreira, 1994), a sequência superior alóctone e a sequência inferior autóctone, ambas caracterizadas pela intercalação de xistos e grauvaques.

2.3.2 SEQUÊNCIA ESTRATIGRÁFICA DA ÁREA DA MINA DE NEVES-CORVO

A sequência estratigráfica da área da Mina de Neves-Corvo pode ser visualizada na figura 2.5 e inclui as seguintes unidades, da base para o topo:

SYSTEM	SERIES	BIOZONE			
		Miospores	Ammonoids		
CARBONIFEROUS	LATE VISEAN A	NM	Go α	Mt1	Mértola Formation
		NM		r g v s	r - Brancanes Formation g - Godinho Formation v - Green Purple Shales Fm. s - Grandaços Formation
		NM		Intermediate Tectonic Unit Tectonic repetitions of r, g, v, s formations	
		TS		Gray siliceous shale, black shale with phosphatic nodules (r'b), acid volcanics	
	LATE VISEAN B	VF	Go β	Mt2	Mértola Formation
DEVONIAN	LATE FAMENNIAN	LN		T3 SM1	Jc - Jasper and carbonate unit r'a - Black pyritic and graphitic shales Sm1 - Massive sulfides n - Neves Formation and stockwork
		LN		T2	T2 - Felsic tuffs and stockwork
		<i>flexuosa-cornuta</i>		TB2	TB2 - Upper Tufo-Brechoide Unit
		<i>flexuosa-cornuta</i>		T1	T1 - Felsic Rocks
		<i>flexuosa-cornuta</i>		nq TB1 T0 TB0	nq - Shales and quartzites TB1 - Middle Tufo-Brechoide Unit T0 - Felsic volcanic rocks TB0 - Lower Tufo-Brechoide Unit
				Q P	Phyllite-Quartzite Formation: dark shales (P), quartzites (Q) and limestones (C)

Figura 2.4 Sequência estratigráfica da área da Mina de Neves-Corvo (adaptado de Oliveira et al., 1997).

Grupo Filito-Quartzítico (PQ) – No Ramo Sul, este grupo aflora no centro do anticlinal de Pomarão que constitui a terminação ocidental do grande anticlinal de Puebla de Guzmán em Espanha, no extremo SW do anticlinal de Rosário, com prolongamento para a Mina de Neves-Corvo (Dias et al., 2011). Esta unidade mais inferior é composta por xistos negros, com finas intercalações de quartzitos e siltitos com espessura e comprimento variáveis. No topo desta formação, verifica-se a transição para o CVS inferior pela presença de lentículas calcárias intercaladas nos xistos.

Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS) – Sequência Inferior Autóctone – A região da Mina de Neves-Corvo possui uma sucessão litológica onde está presente um substrato detrítico com xistos, quartzitos, carbonatos e rochas básicas nele intrusivas, xistos negros na parte inferior e xistos Borra de Vinho remobilizados. A Sequência Inferior Alóctone assenta em concordância sobre o PQ e caracteriza-se pela alternância de rochas vulcânicas e sedimentares. Da base para o topo, verificam-se as seguintes unidades: rochas vulcânicas básicas, rochas vulcânicas félsicas, formação do Corvo, formação de Neves, rochas vulcânicas félsicas, zona de minério do tipo fissural, sulfuretos maciços e, finalmente, uma unidade carbonatada (jaspes) no topo.

Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS) – Sequência Superior Alóctone – Na Sequência Superior Alóctone, da base para o topo, verificam-se as seguintes unidades: formação da Graça, rochas vulcânicas félsicas, rochas intrusivas básicas, formação de Grandaços, formação Borra de Vinho, formação de Godinho, formação de Brancanes e, finalmente, a formação de Mértola no topo. As massas mineralizadas de Neves-Corvo encontram-se intercaladas com os xistos negros da Formação de Neves. O regime tectónico sofreu uma inversão, de extensivo a compressivo, o que afetou toda a sequência estratigráfica (Oliveira et al., 2004).

Grupo Flysh do Baixo Alentejo (GFBA) – O GFBA constitui uma sucessão de sedimentos turbidíticos profundos, com espessura superior a 5 km, divididos em três unidades litoestratigráficas: formações de Mértola, Mira e Brejeira (Oliveira et al., 1979). A formação de Mértola é constituída por bancadas de grauvaques alternadas com xistos argilosos e siltitos.

2.4 METALOGÉNESE E MINERALIZAÇÕES

Considerando, quer os sulfuretos maciços quer as mineralizações do tipo *stockwork* (designado por minério fissural na Mina de Neves-Corvo), a tonelagem de sulfuretos polimetálicos acumulados na FPI ascende a mais de 2.500 milhões de toneladas (Mt), distribuídas por cerca de 88 depósitos gigantes (mais de 100 Mt) e supergigantes (mais de 200 Mt; por exemplo Neves-Corvo). Todos os depósitos da FPI datados até hoje indicam que a atividade hidrotermal responsável pelas mineralizações ocorreu principalmente entre o Fameniano e o final do Tournaisiano (Pereira et al., 1996; Oliveira et al., 1997; Mathur et al., 1999; Relvas et al., 2001).

Ocorrem sedimentos químicos de natureza siliciosa e de origem hidrotermal com uma expressão muito significativa em várias posições estratigráficas do CVS, marcando os horizontes mineralizados, a teto dos sulfuretos maciços e lateralmente. A fácies de sedimentos hidrotermais é representada por jaspes

hematíticos vermelhos (afetadas por alteração redutora) a teto dos corpos mineralizados, que são valorizados como bons critérios de prospeção (Barriga & Fyfe, 1988).

Sob o ponto de vista geoquímico, o jazigo de Neves-Corvo constitui um objeto geológico excecional, quer no contexto da província metalogénica onde se insere, quer à escala mundial (Relvas, 2000; Pacheco et al., 2003). A geoquímica dos minérios de sulfuretos maciços de Neves-Corvo contrasta com a dos depósitos típicos da FPI. O conteúdo em cobre e o seu rácio ($100 \cdot \text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Zn}) > 50$) afastam-se significativamente dos valores característicos nesta província ($15 < 100 \cdot \text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Zn}) < 25$). Para além das elevadas concentrações de cobre e zinco com interesse económico, há ainda que chamar a atenção para a presença de elementos valorizadores do concentrado, como a prata e o índio. A mineralização resulta da atividade muito prolongada de um sistema hidrotermal com várias contribuições de fluidos e metais, dividindo-se em dois episódios mineralizantes principais: i) episódio precoce que levou à precipitação maciça da cassiterite e ii) episódio subsequente que gerou os sulfuretos maciços. Os *stockworks*, especialmente independentes, alimentaram os eventos mineralizantes (Relvas, 2000). Geralmente, no caso dos depósitos de origem hidrotermal, a sequência paragenética apresenta características comuns e segue pela ordem em termos de decréscimo da abundância geoquímica dos metais. Os óxidos formam-se numa fase inicial da evolução do fluido mineralizado, seguindo-se a formação dos sulfuretos de ferro, zinco e cobre e, mais tarde, formação da prata. Um dos últimos elementos a precipitar é o ouro. De referir que cada depósito possui uma sequência paragenética única (Peters, 1987).

A tabela 2.1 sintetiza os tipos de mineralização, designações e abreviaturas utilizadas na Mina de Neves Corvo.

Tabela 2.1 – Tipos de mineralização e de minério; fissural é a designação adotada para a mineralização do tipo *stockwork*

Minério / estéril		Mineralização	Código)
Minério de	cobre	Sulfureto maciço de cobre	MC
		Sulfureto maciço de cobre e zinco	MCZ
		Fissural de cobre	FC
	zinco	Sulfureto maciço de zinco	MZ
		Sulfureto maciço de zinco e chumbo	MZP
		Fissural de zinco	FZ
	estanho	Sulfureto maciço de estanho	MT
		Fissural de estanho	FT
Estéril		Sulfureto maciço estéril	ME
		Fissural estéril	FE

Sulfuretos maciços – Os sulfuretos maciços de Neves-Corvo geralmente ocorrem intercalados com os xistos negros da Formação de Neves (Oliveira et al., 2004), em zonas com conteúdo silicatado importante. As lenticulas de sulfuretos maciços estão interligadas e constituem-se como um único horizonte de mineralização em Neves-Corvo. O mineral mais abundante é a pirite, seguindo-se a calcopirite.

Mineralização do tipo fissural – A mineralização fissural, que ocorre a muro dos sulfuretos maciços, é do tipo *stockwork* e está associada aos xistos negros do muro e tufos ácidos subjacentes. Apresenta características filonianas, em geral discordantes com a macroestrutura do jazigo. Os veios e filonetes possuem espessura variável e entrecruzam a rocha encaixante de muro. Na zona do contacto dos xistos negros com os sulfuretos maciços verifica-se concordância estrutural com tendência a desenvolver uma textura bandada. A rede de fissuras é mais densa para o topo dos tufos ácidos e xistos negros do muro e desaparece progressivamente para a base da pilha vulcânica. A presença de cassiterite na mineralização do tipo fissural aparece sempre abaixo da calcopirite, que se desenvolve a topo, obedecendo assim à zonalidade vertical de Neves-Corvo (Carvalho & Ferreira, 1994).

2.5 O DEPÓSITO DO ZAMBUJAL

O depósito do Zambujal localiza-se na extremidade SE do anticlinal principal (figuras 2.5 e 2.6). Estima-se que tenha 550 metros de comprimento por 600 metros de largura e a espessura máxima de 53 metros, entre os 350 e os 480 metros de profundidade. Contém mineralização cuprífera e zincífera de baixo teor com uma sequência de deposição semelhante à das restantes massas. Verifica-se a predominância da pirite maciça relativamente às mineralizações de cobre e zinco. A mineralização fissural cuprífera ocorre nos xistos negros e vulcânicos do muro (Pacheco et al., 2003).

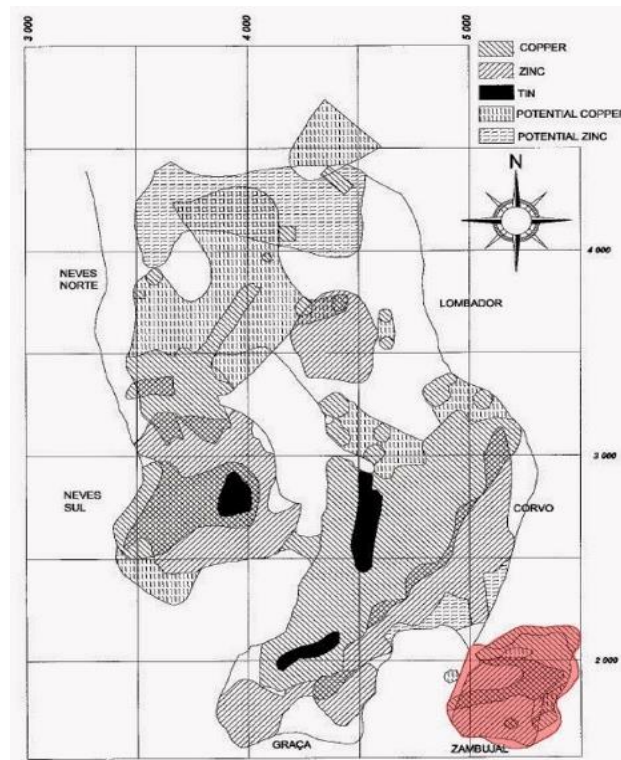


Figura 2.5 – Localização das massas mineralizadas em planta, e indicação do tipo de minério e zonalidade metálica; o depósito do Zambujal está destacado a cor vermelha (adaptado de Carvalho & Ferreira, 1994).

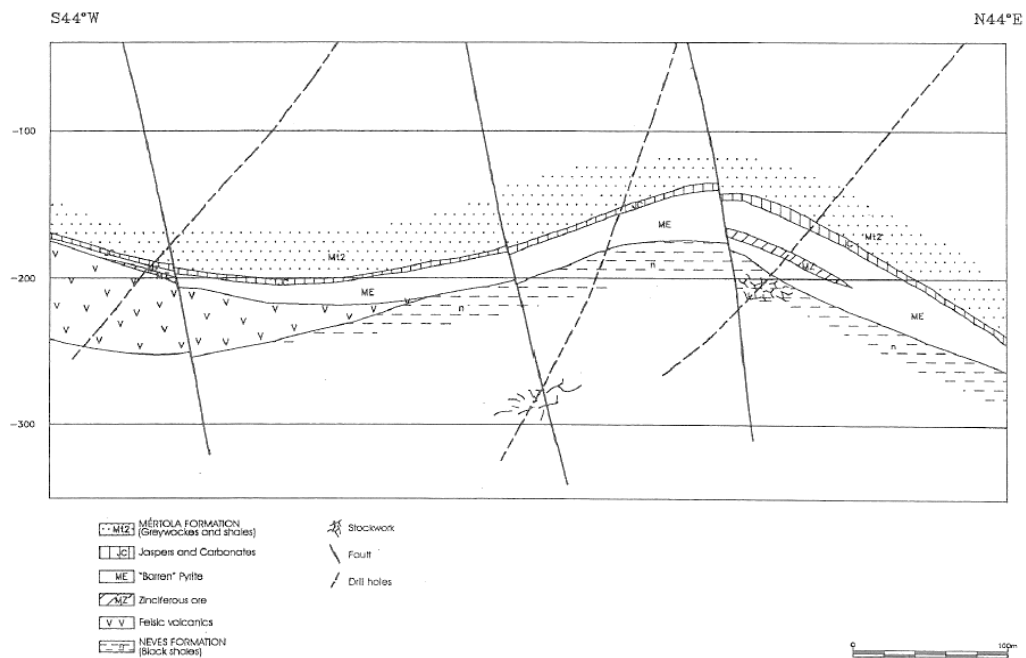


Figura 2.6 – Perfil geológico do depósito do Zambujal, Mina de Neves-Corvo (adaptado de Carvalho & Ferreira, 1994).

3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 ESTADO DA ARTE

A geoestatística tem por objetivo caracterizar a dispersão espacial e/ou espaço-temporal de grandezas que definem a quantidade e qualidade de recursos naturais (Isaaks & Srivastava, 1989; Soares, 2006; Caers, 2011). Utiliza: (i) ferramentas estatísticas que quantificam a continuidade espacial das variáveis em estudo; (ii) modelos de interpolação espacial baseados na sua variabilidade estrutural; (iii) modelos de simulação estocástica que, ao gerarem várias imagens do fenómeno espacial em estudo, quantificam a incerteza local e global.

A geoestatística começou a ser desenvolvida durante as décadas de 60 e 70 do século passado para a indústria mineira, com o propósito da estimação de teores em metal em localizações não amostradas, ponderando adequadamente os teores disponíveis. Matheron, em 1962, introduziu o termo geoestatística com a seguinte definição: “geoestatística é a utilização do formalismo de funções aleatórias no reconhecimento e estimação de fenómenos naturais” (Isaaks & Srivastava, 1989). Atualmente, os princípios da geoestatística são aplicados a todos os casos de estudo onde as variáveis intervenientes revelem estrutura espacial e/ou temporal, nomeadamente reservatórios, sistemas aquíferos, sistemas ambientais e ecologia.

A modelação de recursos minerais por métodos geoestatísticos requer grandes quantidades de dados, tendo-se desenvolvido com a sistematização das técnicas de furação, amostragem e determinações analíticas. Os métodos utilizados na interpretação e modelação geológica também evoluíram, desde a interpretação perfil a perfil até à geração dos sólidos 3D (Almeida et al., 1993; Matias et al., 2015). As técnicas para a estimação de teores baseadas na krigagem passaram a ter em conta modelos de coregionalização e estimação com informação secundária (Soares, 2001; Almeida, 2010).

Um estudo geoestatístico para a quantificação da quantidade de metal num depósito mineral segue as seguintes etapas principais (Rossi & Deutsch, 2014): (i) especificação dos objetivos do estudo e inventário dos dados; (ii) divisão do volume de interesse (massa ou depósito mineral) em regiões específicas conforme critérios geológicos, genéticos, morfológicos ou quantitativos; (iii) análise do zonamento das propriedades de interesse conforme as regiões; (iv) inferência dos parâmetros estatísticos para a criação do modelo espacial de cada variável, em cada região; (v) estimação dos valores de cada variável nos locais não amostrados apoiados por uma malha regular de blocos; (vi) validação do modelo estimado, assegurando que o modelo geológico e modelo de teores se encontram consistentes com os dados, domínios geológicos e com a metodologia utilizada na estimação; (vii) simulação de múltiplas realizações com o objetivo de caracterizar a incerteza local (balanço entre a informação disponível e a sua heterogeneidade).

Tradicionalmente, a construção de um modelo de um depósito mineral envolve a caracterização da morfologia e dos teores dos elementos com interesse económico e penalizantes. Estes procedimentos podem ser desenvolvidos recorrendo-se a métodos de estimação geoestatística (krigagem) e/ou a

métodos de simulação geoestatística (Isaaks & Srivastava, 1989; Emery & Robles, 2009; Almeida, 2010, Charifo et al., 2013, 2014).

Um modelo morfológico pode representar tanto as fronteiras que delimitam o depósito como o conjunto dos diferentes tipos de mineralização ou litologias presentes no interior dos limites desse mesmo depósito, que numa fase posterior irão condicionar os teores em metal. Em depósitos com contactos bem definidos, nomeadamente os estratiformes, a geometria é mais simples e envolve a modelação das superfícies do topo e da base (Charifo et al., 2013). No caso de outros depósitos como, por exemplo, os de sulfuretos maciços, as fronteiras com a rocha encaixante são mais difusas e irregulares, pelo que a modelação é mais complexa. Nestes últimos, a definição dos limites do corpo mineralizado com a rocha encaixante, e dos limites entre os vários tipos de minério, é feita, principalmente, com os dados das sondagens apoiados na interpretação e coerência geológica. Quando os corpos geológicos mineralizados são irregulares e os teores são muito variáveis no espaço, o processo de limitação por regiões torna-se mais subjetivo e dependente da interpretação geológica (Almeida et al., 1993). O procedimento habitual é a digitalização das fronteiras de cada tipo de mineralização em vários perfis seguindo-se a interpolação de superfícies. O resultado é um modelo morfológico de baixa-resolução. A delimitação das fronteiras deve ser precisa de modo a evitar perdas e diluição do metal aquando da construção do modelo de blocos (Rossi & Deutsch, 2014). Num jazigo mineral, onde coexistem vários tipos de minérios que condicionam os teores ou propriedades de interesse, é necessário construir um modelo dos litogrupos ou modelo morfológico de alta-resolução, delimitado pelo modelo morfológico de baixa-resolução, onde está presente informação mais detalhada relativamente à geologia à escala do bloco (Quental et al., 2012). Aqui podem ser utilizadas metodologias geoestatísticas baseadas no formalismo da indicatriz tal como a krigagem da indicatriz (KI), simulação sequencial da indicatriz (SSI) ou simulação com estatísticas multiponto (Deutsch & Journel, 1998; Goovaerts, 1997; Srivastava, 2005).

O modelo de teores é a ferramenta utilizada na quantificação das quantidades em metal, condicionado aos dados experimentais e ao modelo morfológico. Para este propósito, as metodologias geoestatísticas fornecem as soluções não enviesadas e de erro de estimação mínimo, tais como a krigagem, simulação sequencial Gaussiana (SSG), e simulação sequencial direta (SSD) (Deutsch & Journel, 1998; Goovaerts, 1997; Soares, 2001). Quer as transições entre as mineralizações e a rocha encaixante sejam bruscas ou suaves, o condicionamento zonal combina, simultaneamente, a inferência de uma dada propriedade com as diferentes litologias ou tipos de minério a que pertence (Almeida et al., 1996; Glacken & Snowden, 2001).

Os resultados destes modelos, morfologia e teores, constituem as estimativas das propriedades de interesse e são sempre apresentados em malhas 3D de blocos. A geometria do modelo de blocos depende das características intrínsecas do depósito, da quantidade de informação disponível, espaçamento entre as amostras das sondagens e do método de mineração (Rossi & Deutsch, 2014). A dimensão de cada bloco deve ser equivalente à dimensão das pegadas de fogo ou equipamentos de desmonte. Às vezes, a orientação das massas minerais não é coincidente com os eixos coordenados, por isso reorientam-se os dados georeferenciados de tal forma que a direção principal da estrutura dos

depósitos coincida com um eixo coordenado. Este procedimento facilita a interpretação das sondagens em perfis, ajuda ao cálculo de variogramas e otimiza a dimensão das malhas de blocos.

Os resultados da estimação por krigagem constituem uma primeira estimativa global dos recursos (Diehl & David, 1982; Akbar, 2012). Os resultados das simulações permitem, ao gerar vários cenários com a mesma probabilidade de ocorrência, quantificar a incerteza local do depósito mineral em estudo (Matias et al., 2015). O uso de modelos geoestatísticos de simulação estocástica é uma opção na abordagem de problemas a nível ambiental ou das Ciências da Terra cujo objetivo seja a caracterização da distribuição espacial de um certo atributo, bem como a avaliação da sua incerteza espacial (Goovaerts, 1997). Um modelo de simulação geoestatística reproduz imagens da variabilidade espacial do fenómeno impondo a função de distribuição cumulativa (*cumulative distribution function - cdf*) dos dados, o variograma e os dados na sua localização. As imagens de igual probabilidade obtidas da simulação podem ser usadas na caracterização da incerteza local e global do fenómeno, no planeamento das sequências de exploração e nos estudos de viabilidade económica (Dimitrakopoulos, 2009). As duas abordagens, estimação e simulação devem ser feitas simultaneamente, e globalmente devem apresentar quantitativos semelhantes.

3.2 METODOLOGIA

No presente trabalho propõe-se uma metodologia (ver figura 3.1) para a modelação do depósito de sulfuretos do Zambujal que iniciou exploração na Mina de Neves-Corvo em 2006. Este depósito subdivide-se em duas regiões: minério do tipo maciço no topo (R_M) e minério do tipo fissural na base (R_F). O minério fissural possui uma matriz de sulfuretos e rocha encaixante em proporções variáveis (diluição interna), sendo que um modelo morfológico de detalhe deverá quantificar em cada suporte / bloco a proporção volumétrica de sulfuretos relativamente ao volume total (variável $P(x)$). Num minério maciço $P(x)$ aproxima-se de um, num minério fissural $P(x)$ terá valores intermédios, e na rocha encaixante sem sulfuretos $P(x)$ é zero. Teoricamente, considerando que a recuperação dos metais na lavaria depende da proporção de rocha encaixante, um modelo morfológico que quantifique a proporção de minérios na matriz rochosa permite a implementação de um teor de corte secundário mais baixo para os minérios fissurais.

Para a construção deste modelo morfológico de proporções é necessário caracterizar, em primeiro lugar, a variável $P(x_i)$ na localização das amostras e depois estimar e/ou simular esta variável para todo o depósito. Como esta variável não é medida nas amostras, propõe-se a utilização da densidade da rocha que é medida nas sondagens como indicador indireto da proporção volumétrica dos sulfuretos na matriz. A diferença entre a densidade da rocha encaixante (em média 2,8) e a densidade dos sulfuretos (acima de 4,0) é grande e, por isso, numa amostra se forem conhecidos a densidade $D(x_i)$, os teores dos elementos químicos mais significativos $Z_j(x_i)$, e os principais minerais da paragénese do depósito do Zambujal, é possível apresentar soluções para a variável $P(x_i)$ em cada amostra, sendo que esta variável pode ser modelada como uma função aleatória para a totalidade do depósito.

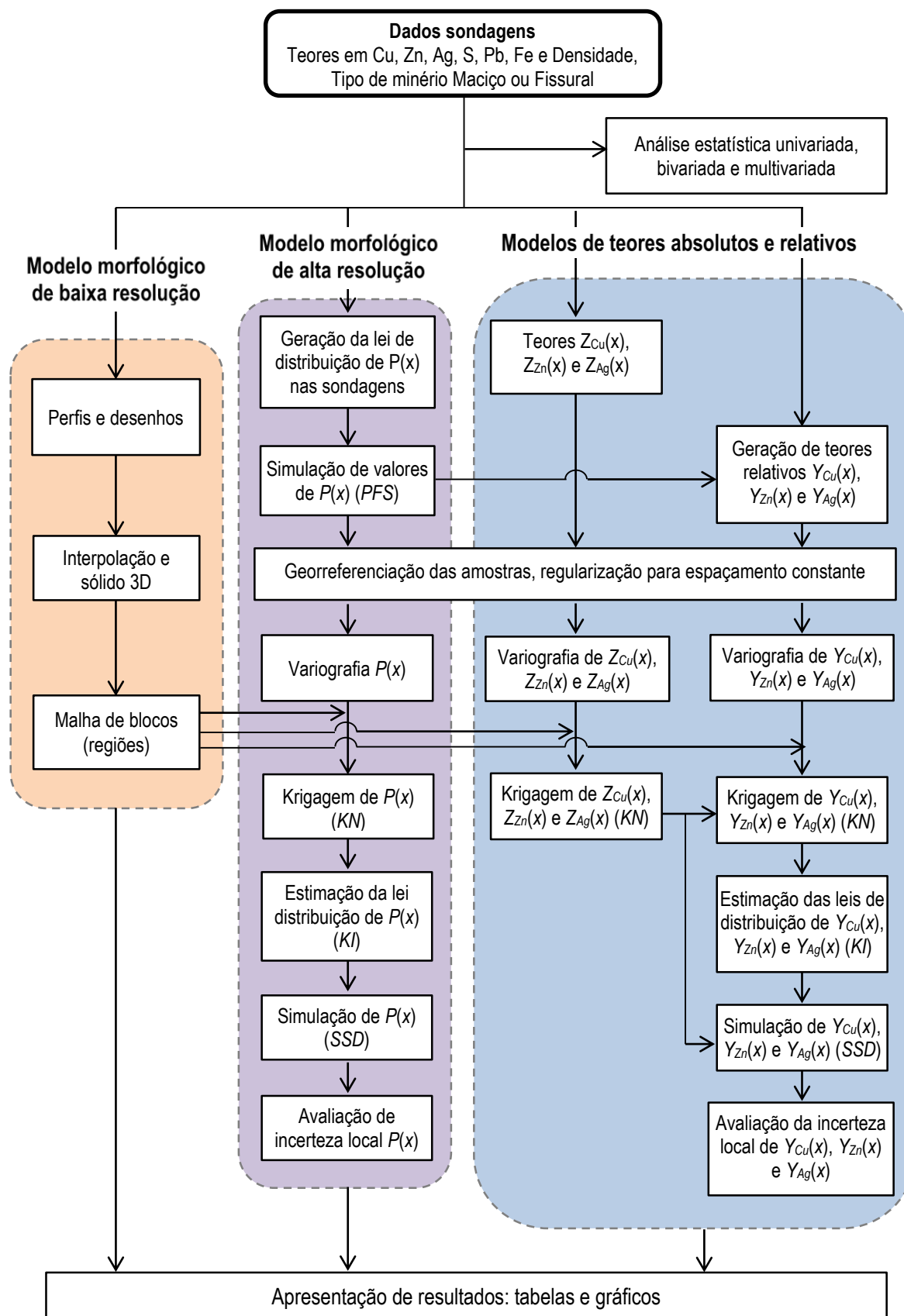


Figura 3.1 Fluxograma da metodologia proposta neste estudo para modelação do depósito do Zambujal.

Outro aspeto relevante da modelação de teores num depósito com minérios fissurais é o mapeamento dos teores na fração dos sulfuretos, os chamados teores relativos. Para o efeito foram calculadas variáveis auxiliares de teores para cada metal $Y_j(x)$. Para uma amostra localizada em x_i , com proporção de sulfuretos igual a $P(x_i)$, e teores em cobre $Z_{Cu}(x_i)$, zinco $Z_{Zn}(x_i)$ e prata $Z_{Ag}(x_i)$, os teores relativos são expressos pelos quocientes entre os teores em metal e as proporções. A modelação dos teores na fração de sulfuretos possui duas vantagens: (i) os variogramas dos teores são filtrados pela variável morfológica $P(x)$; (ii) é introduzida mais informação em cada bloco seleção, nomeadamente os teores relativos (Almeida et al., 1996), a proporção de minérios e a diluição interna.

O modelo da variável $P(x)$ constitui um modelo morfológico detalhado ou de alta resolução que condiciona a construção dos modelos de teores em metal cobre $Z_{Cu}(x)$, zinco $Z_{Zn}(x)$ e prata $Z_{Ag}(x)$ e dos teores relativos em cobre $Y_{Cu}(x)$, zinco $Y_{Zn}(x)$ e prata $Y_{Ag}(x)$.

Nos pontos que se seguem descreve-se mais detalhadamente algumas etapas indicadas no fluxograma.

3.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIADA, BIVARIADA E MULTIVARIADA

Todos os dados das sondagens utilizados neste trabalho foram facultados pela *Lundin Mining* e estão organizados em quatro tabelas: (i) listagem de sondagens (código da sondagem, coordenadas X, Y, Z da boca da sondagem e metros furados); (ii) orientação das sondagens (código da sondagem, azimute e inclinação medidos pontualmente ao longo da sondagem); (iii) tipos de minério (código da sondagem, metragem inicial e final e código *orelens*¹) e (iv) teores e densidade (código da sondagem, metragem inicial e final, teores e densidade). Refira-se que algumas sondagens são feitas a partir da superfície, e outras a partir das galerias de desenvolvimento.

A primeira etapa do trabalho experimental consistiu na análise estatística univariada, bivariada e multivariada por Análise em Componentes Principais (ACP) dos elementos químicos com mais interesse para este estudo (Fe, Cu, Zn, Pb, S e Ag) e da densidade da rocha. Esta análise estatística preliminar permitiu a compreensão das associações mineralógicas e geoquímicas neste jazigo em particular, e justificou a proposta de construção da variável proporção $P(x)$ à custa das restantes variáveis e da paragénese do depósito do Zambujal.

3.2.2 ESTIMAÇÃO DA VARIÁVEL $P(x)$ PROPORÇÃO DE SULFURETOS NA MATRIZ ROCHOSA NAS AMOSTRAS RETIRADAS DAS SONDAJENS

Antes da construção do modelo de teores, estimaram-se os valores para a variável morfológica $P(x)$, para todas as amostras das sondagens com determinações analíticas, combinando os valores da

¹ Código Orelens – código correspondente aos diferentes tipos de minério maciço e fissural em Neves-Corvo; MC (Maciço de Cobre), MZ (Maciço de Zinco), ME (Maciço Estéril), MP (Maciço de Chumbo), FC (Fissural de Cobre), FZ (Fissural de Zinco), FE (Fissural Estéril), FP (Fissural de Chumbo).

densidade $D(x)$, os teores dos elementos químicos mais relevantes $Z_j(x)$ e os principais minerais da paragénesis do jazigo. Como já foi referido, esta avaliação explora o contraste dos valores da densidade na rocha encaixante (2,8) e da densidade nos sulfuretos (acima de 4,0). Quanto aos minerais principais da paragénesis do Zambujal, as respetivas fórmulas químicas e densidade são os seguintes: pirite (FeS_2) ($d=5,25$), calcopirite (CuFeS_2) ($d=4,20$), esfalerite (ZnS) ($d=3,85$) e galena (PbS) ($d=7,50$).

A geração da variável morfológica $P(x)$ foi feita do seguinte modo:

- (1) Geração de uma tabela onde são listadas “todas” as combinações possíveis entre proporções dos quatro minerais da paragénesis (pirite, calcopirite, esfalerite e galena) mais a rocha encaixante e onde aparecem calculados a densidade mais os teores nos elementos químicos Fe, Cu, Zn, Pb e S por via das fórmulas químicas dos minerais. O sentido de “todas” é listar a mistura de várias proporções teóricas com uma dada resolução, por exemplo separadas de 0,1 em 0,1%. Por exemplo, se considerarmos uma matriz com 30% de rocha encaixante, 30% de pirite e 40% de calcopirite, $P(x)=0,70$, os resultados teóricos calculados para os teores e densidade são: Fe=26,14%; S=30,01%; Cu=13,85% e $d=4,10$. Outro exemplo, uma matriz com 70% de rocha encaixante, 8% de pirite, 12% de calcopirite, 3% de esfalerite e 7% de galena, $P(x)=0,30$, terá os seguintes resultados calculados para os teores e densidade: Fe=7,38%; S=10,39%; Cu=4,16%; Zn= 2,01%; Pb=6,06% e $d=3,52$.
- (2) Para cada amostra retirada das sondagens, é necessário reter os respetivos teores nos elementos Fe, S, Cu, Zn e Pb mais a densidade; calcular a similitude entre cada amostra expressa nestas seis variáveis (Fe, S, Cu, Zn, Pb e densidade) e cada indivíduo da tabela de valores preparada no ponto anterior, e retirar desta tabela a proporção de sulfuretos $P(x)$ dos indivíduos com maior similitude. Aqui devem ser escolhidas não um único resultado “melhor” mas sim vários resultados, de forma a incorporar a incerteza. Em síntese, nesta fase é obtida, para cada amostra, uma lei de distribuição de soluções para a variável $P(x)$ com a mesma probabilidade de ocorrência.

Para a avaliação da similitude entre as amostras e os valores gerados na tabela do ponto (1), e tendo em conta que as variáveis têm dispersão variada e amplitudes distintas, considerou-se a chamada distância de Gower. Gower (1971) apresentou um coeficiente de similitude ou distância, S_{ij} , entre os indivíduos i e j que pode ser usado em tabelas de dados com variáveis contínuas. Entre os indivíduos i e j para a propriedade k a similitude é expressa por:

$$s_{ij,k} = 1 - \frac{|x_{ik} - x_{jk}|}{R_k}$$

onde R_k é a amplitude da propriedade k . Caso a propriedade k no indivíduo i ou j seja inválida ou ausente, $s_{ij,k} = 0$. Define-se então $\delta_{ij,k} = 1$ no caso da propriedade existir e $\delta_{ij,k} = 0$ caso seja inválida ou ausente. O coeficiente de similitude S_{ij} é expresso por:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^q s_{ij,k}}{\sum_{k=1}^q \delta_{ij,k}}$$

onde $\sum_{k=1}^q \delta_{ij,k}$ indica o número de variáveis (dimensões) entre os indivíduos i e j que podem ser comparadas. O coeficiente de similitude S_{ij} apresenta valores no intervalo 0 (ausência de similitude) a 1 (similitude máxima).

3.2.3 GEORREFERENCIAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES E REGULARIZAÇÃO PARA ESPAÇAMENTO CONSTANTE

Visto que os dados em “bruto” não se encontravam no formato adequado para iniciar o trabalho experimental, foi necessário georreferenciar as amostras ao longo da sondagem e regularizar ou uniformizar os suportes para comprimento constante (no trabalho experimental verificou-se ser 2m o comprimento ideal dos suportes). Como resultado deste processamento obteve-se uma tabela onde cada linha corresponde a um suporte de sondagem com 2 metros de comprimento com as seguintes colunas: coordenadas X, Y, Z do centro de gravidade do suporte, teores em cobre, zinco e prata, densidade e código *ore/ens* (tipo de minério conforme classificação da Somincor).

A obtenção das coordenadas a espaçamento constante ao longo das sondagens é feita com recurso a fórmulas de trigonometria que utilizam a coordenada da boca da sondagem e a orientação da sondagem medida em vários pontos, o primeiro dos quais no início. Este procedimento encontra-se ilustrado na figura 3.2.

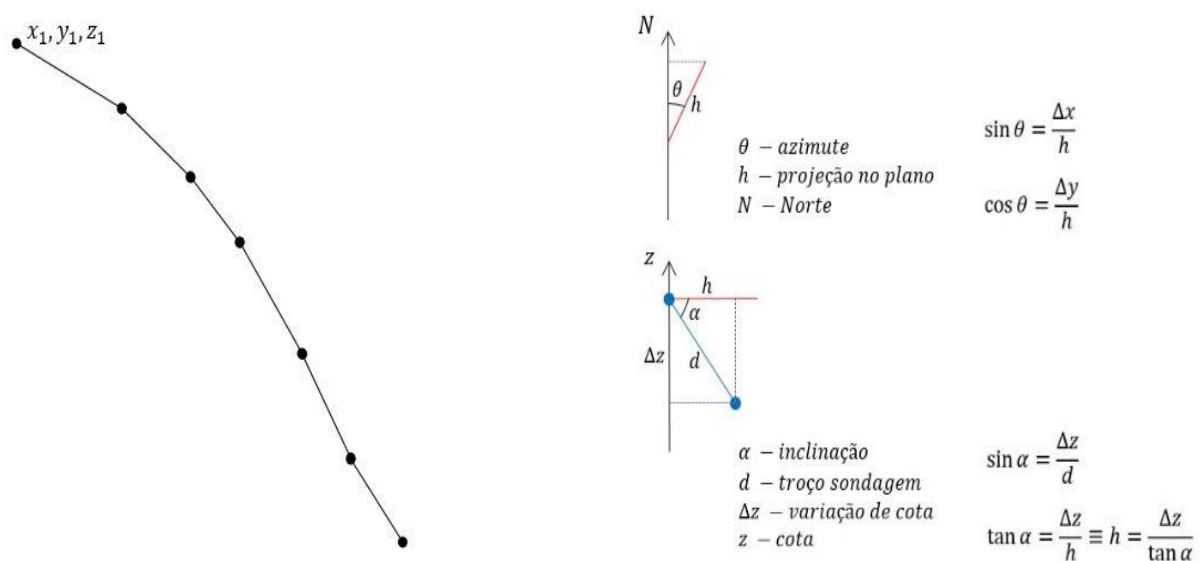


Figura 3.2 Representação de um troço de sondagem, com informação das coordenadas da boca do furo e fórmulas trigonométricas utilizadas na georreferenciação das várias amostras ao longo da sondagem.

3.2.4 MODELO MORFOLÓGICO 3D DE BAIXA RESOLUÇÃO DO DEPÓSITO DO ZAMBUJAL

Para a construção do modelo morfológico 3D de baixa resolução do depósito do Zambujal foi necessário digitalizar os limites das regiões de minério maciço (R_M) e de minério fissural (R_F), em vários perfis, aproximadamente paralelos. A digitalização utilizou os dados das sondagens de produção,

realizadas em áreas já em processo de desmonte, sondagens de avaliação ou reconhecimento, efetuadas sobre perfis transversais às massas, e sondagens de prospecção, executadas a partir da superfície, atravessando a sequência estratigráfica de Neves-Corvo. Destaca-se que esta etapa é subjetiva, podendo variar de pessoa para pessoa, consoante a sua interpretação.

As linhas poligonais que delimitam as regiões mineralizadas geraram por interpolação linear (triangulação) três superfícies que delimitam duas a duas os corpos mineralizados (são dois sólidos 3D): uma para o topo da mineralização maciça (R_M), outra para a transição entre a mineralização maciça e a fissural ($R_M - R_F$) e outra para a base do fissural (R_F). Seguidamente converteu-se o modelo de superfícies, com topologia vetorial, para o modelo de blocos do depósito mineral.

3.2.5 ESTIMAÇÃO POR KRIGAGEM NORMAL DOS TEORES EM METAL E DAS VARIÁVEIS $P(x)$ E $D(x)$ PARA VALIDAÇÃO DO MODELO DE TEORES RELATIVOS

Esta etapa tem por objetivo a estimação por KN dos teores em cobre, zinco e prata, respetivamente $Z_{Cu}(x)$, $Z_{Zn}(x)$ e $Z_{Ag}(x)$, e das variáveis $P(x)$ e $D(x)$ na malha de blocos. Previamente à estimação por krigagem destas variáveis foram calculados e ajustados variogramas experimentais destas variáveis. Os valores estimados permitem quantificar em termos globais e por região (R_M e R_F) a quantidade de minério e a quantidade de metal (volume e tonelagem). Esta informação destina-se a validar os resultados da simulação e da abordagem por teores relativos, cujos resultados devem ser da mesma ordem de grandeza.

3.2.6 MODELO MORFOLÓGICO DE ALTA RESOLUÇÃO DA VARIÁVEL $P(x)$

Em cada troço de sondagem x_i foram calculadas em etapa anterior n soluções equiprováveis para a variável $P(x)$, constituindo localmente a lei de distribuição de $P(x_i)$. A variância local das leis de distribuição mede a dispersão das soluções encontradas e está relacionada com a coerência e os erros das determinações laboratoriais.

No cálculo e modelação dos variogramas da variável $P(x)$ e para a estimação por krigagem desta variável para todo o depósito é admissível utilizar os valores médios da lei de distribuição. Todavia, para gerar as imagens simuladas de $P(x)$ é conveniente utilizar localmente não o valor médio mas a sua lei de distribuição.

Para o efeito, fez-se a transposição das leis de distribuição locais de $P(x)$, da localização dos suportes para a malha de blocos do depósito do Zambujal, recorrendo ao procedimento de simulação por campos de probabilidade (Goovaerts, 1997), tendo sido gerados tantos resultados quantos os que se pretendem simular da variável $P(x)$. Este procedimento garante que os valores gerados seguem as leis locais e também respeitam o modelo de variograma da variável $P(x)$, conforme calculado com os valores médios da lei de distribuição. No capítulo seguinte, Fundamentos Teóricos da Geoestatística, dedica-se um subcapítulo à descrição deste método de simulação.

Depois de gerados os valores de $P(x)$ na localização das sondagens, a variável $P(x)$ é modelada por SSD na malha de blocos do depósito do Zambujal. Na simulação é utilizada uma versão alterada do algoritmo original proposto por Soares, 2001 e que se destina a condicionar os resultados a dois histogramas regionais, respetivamente $P(x)|R_M$ e $P(x)|R_F$, em detrimento do uso de uma *cdf* global. A simulação é executada simultaneamente para as duas regiões. Para desagrupar os dados das sondagens, as leis de distribuição regionais, $P(x)|R_M$ e $P(x)|R_F$, são calculadas por KI para várias classes da variável $P(x)$ e, simultaneamente, por região R_M e R_F .

3.2.7 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS AUXILIARES TEORES RELATIVOS E SIMULAÇÃO DESTAS VARIÁVEIS

A avaliação dos teores no depósito do Zambujal, onde a proporção de sulfuretos na matriz é variável no espaço, recorreu às variáveis auxiliares designadas teores relativos calculadas pelo quociente entre os teores medidos e a proporção de sulfuretos. Na prática representam o teor em metal na componente sulfureto da matriz, isto é, o teor em metal se a amostra fosse avaliada em laboratório excluindo a rocha encaixante onde o teor em metal é zero.

Conhecidos os teores em cobre, zinco e prata (respetivamente $Z_{Cu}(x_i)$, $Z_{Zn}(x_i)$ e $Z_{Ag}(x_i)$) numa localização genérica x_i , conhecendo-se igualmente a proporção de sulfuretos $P(x_i)$, os teores relativos $Y_{Cu}(x_i)$, $Y_{Zn}(x_i)$, e $Y_{Ag}(x_i)$ são expressos por:

$$Y_{Cu}(x_i) = \frac{Z_{Cu}(x_i)}{P(x_i)}$$

$$Y_{Zn}(x_i) = \frac{Z_{Zn}(x_i)}{P(x_i)}$$

$$Y_{Ag}(x_i) = \frac{Z_{Ag}(x_i)}{P(x_i)}$$

Por exemplo, se uma amostra apresentar o teor em cobre $Z_{Cu}(x_i)$ de 2% e a proporção de sulfuretos $P(x_i)$ for 0,7, o teor relativo de cobre $Y_{Cu}(x_i)$ nesta amostra é recalculado para $2\% / 0,7 = 2,857\%$.

A simulação dos teores relativos de metal, as variáveis $Y_{Cu}^s(x_i)$, $Y_{Zn}^s(x_i)$ e $Y_{Ag}^s(x_i)$, segue a mesma metodologia usada para a variável $P(x)$ descrita anteriormente, envolvendo o cálculo de variogramas experimentais e ajuste de um modelo teórico, KI na estimação de histogramas condicionais para cada região, $Y_i(x) | R_M$ e $Y_i(x) | R_F$, e na simulação por SSD, condicionada aos histogramas regionais.

Importa referir que a simulação das variáveis $Y_i(x)$ está relacionada com as simulações de $P(x)$ na localização das sondagens porque são estes valores simulados que geram as variáveis $Y_i(x)$ na localização das sondagens. Foram simuladas n_1 imagens de $P(x)$ na localização das sondagens, nesta fase são simuladas n_2 imagens por cada uma de $P(x)$, assim ao todo nesta fase são geradas $n_1 \times n_2$ realizações de teores relativos.

3.2.8 VALIDAÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Completadas a estimação e as simulações, ficam disponíveis as seguintes variáveis na malha de blocos:

- (1) Codificação em região R_M e R_F resultante da conversão do modelo morfológico de superfícies ou sólido 3D;
- (2) Variável $D^*(x)$, estimação por KN;
- (3) Variável $P^*(x)$, estimação por KN e n_1 imagens simuladas por SSD;
- (4) Variáveis teores em cobre, zinco e prata, respetivamente $Z_{Cu}^*(x_i)$, $Z_{Zn}^*(x_i)$ e $Z_{Ag}^*(x_i)$ estimadas por KN;
- (5) Variáveis teores relativos em cobre, zinco e prata, respetivamente $Y_{Cu}^*(x_i)$, $Y_{Zn}^*(x_i)$ e $Y_{Ag}^*(x_i)$ estimados por KN e simulados por SSD ($n_1 \times n_2$ realizações).

Podem então ser apresentados os seguintes resultados quantitativos (com n_b – número de blocos contidos no sólido, v_b – volume de cada bloco) tendo por base os valores estimados:

- (1) Densidade média desagrupada $\overline{D^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} D^*(x_i)}{n_b}$, volume total de minério ($n_b \cdot v_b$) e tonelagem total de minério no sólido 3D $T_m = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} D^*(x_i) \cdot v_b}{n_b}$

- (2) Proporção média de sulfureto $\overline{P^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} P^*(x_i)}{n_b}$, volume total de sulfuretos $V_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} P^*(x_i) \cdot v_b}{n_b}$;

- (3) Teores médios desagrupados em cobre, zinco e prata e tonelagens totais destes metais $T_i(x)$;

$$\overline{Z_{Cu}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Z_{Cu}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Cu1} = \sum_{i=1}^{n_b} (Z_{Cu}^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

$$\overline{Z_{Zn}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Z_{Zn}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Zn1} = \sum_{i=1}^{n_b} (Z_{Zn}^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

$$\overline{Z_{Ag}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Z_{Ag}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Ag1} = \sum_{i=1}^{n_b} (Z_{Ag}^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

- (4) Teores relativos médios desagrupados em cobre, zinco e prata e tonelagens totais destes metais $T_i(x)$;

$$\overline{Y_{Cu}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Y_{Cu}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Cu2} = \sum_{i=1}^{n_b} (Y_{Cu}^*(x_i) \cdot P^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

$$\overline{Y_{Zn}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Y_{Zn}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Zn2} = \sum_{i=1}^{n_b} (Y_{Zn}^*(x_i) \cdot P^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

$$\overline{Y_{Ag}^*} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} Y_{Ag}^*(x_i)}{n_b} \quad T_{Ag2} = \sum_{i=1}^{n_b} (Y_{Ag}^*(x_i) \cdot P^*(x_i) \cdot D^*(x_i) \cdot v_b)$$

Aqui deve verificar-se:

$$T_{Cu_1} \sim T_{Cu_2}$$

$$T_{Zn_1} \sim T_{Zn_2}$$

$$T_{Ag_1} \sim T_{Ag_2}$$

(5) Imagens da incerteza local de $P(x)$ e teores médios e teores relativos em cobre, zinco e prata.

Apresentam-se ainda curvas da quantidade de minério e da quantidade do metal cobre em função do teor de cobre.

3.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA GEOESTATÍSTICA

3.3.1 VARIOGRAFIA

A variografia é a ferramenta fundamental da geoestatística e serve para quantificar a continuidade espacial de uma variável tendo em vista a sua estimação e simulação (Isaaks & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997; Soares, 2006). A compreensão dos dados e da geologia é fundamental para que se evitem erros que serão propagados em fases mais a jusante. Desse modo deve ser feita uma cuidada análise dos estatísticos básicos. Tem de se ter em atenção aos valores extremos ou outros possivelmente erráticos visto que cada valor tem um elevado peso e que, desse modo, tendem a influenciar os variogramas experimentais.

Na prática da geoestatística mede-se a continuidade espacial de uma variável $Z(x)$ para vários valores de distância e direção vetor h (ou passo), através do variograma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha}) - Z(x_{\alpha} + h)]^2$$

onde $N(h)$ corresponde ao número de pares de pontos para cada valor do passo h . De modo a analisar a continuidade espacial com recurso a esta ferramenta em diferentes direções no espaço, é necessário vários valores de h .

Na variografia consideram-se os seguintes parâmetros fundamentais (Goovaerts, 1997; Soares, 2006):

Amplitude (a) – Corresponde à distância a que o variograma atinge o patamar (C), que reflete a distância a partir da qual as amostras deixam de estar correlacionadas entre si. Maior amplitude traduz-se num comportamento mais contínuo, significando que a variável está bem correlacionada.

Patamar (C) – Indica a variância intrínseca à variável em estudo, refletindo a sua dispersão espacial.

Efeito de Pepita (C_0) – Corresponde ao valor do variograma para distâncias semelhantes ao espaçamento mínimo entre amostras ($h=0$), caracterizando a variabilidade a pequena escala. Dá indicação de valores erráticos derivados de fatores externos, tais como amostragem mal efetuada ou,

em certos casos, elevada variabilidade a pequena escala. Para valores de passo (h) nulos ou próximos de zero, o valor do variograma é zero.

A modelação de um variograma é realizada com recurso a funções definidas positivas que cobrem as situações de dispersão de fenómenos espaciais (Soares, 2006). Por exemplo, o modelo esférico, um dos mais utilizados, é uma função com dois parâmetros, o patamar C e a amplitude a .

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{para } h \leq a \\ C, & \text{para } h > a \end{cases}$$

3.3.2 O ESTIMADOR GEOESTATÍSTICO DE KRIGAGEM

A krigagem é uma técnica de estimação utilizada para fazer a previsão de valores em localizações não amostradas (Goovaerts, 1997; Soares, 2006) à custa de valores conhecidos em locais vizinhos. A krigagem consiste basicamente no cálculo dos ponderadores λ_α às amostras conhecidas $Z(x_\alpha)$ que tornam a estimação não enviesada e minimizam a variância do chamado erro de estimação (estimador BLUE). Assim:

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \cdot Z(x_\alpha)$$

3.3.3 SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA E SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DIRETA

Os modelos de simulação estocástica têm como objetivo a geração de imagens “virtuais” da realidade que refletem as características da variável ou fenómeno em estudo, a variabilidade do conjunto de amostras, a lei de distribuição da variável em estudo e a continuidade espacial. Assim, estes modelos fornecem um conjunto de imagens, com a mesma probabilidade de ocorrência, e com a mesma variabilidade espacial dos dados experimentais avaliada pelo variograma, de modo a que em todas as imagens sejam reproduzidos os mesmos estatísticos de variabilidade espacial (histograma e variograma ou covariância espacial) quantificados pelas amostras (Soares, 2006).

Com uma simulação geoestatística não se pretende obter a imagem mais provável das características de um dado recurso (característica da estimação por krigagem), mas sim, um conjunto de imagens equiprováveis com a mesma variabilidade espacial dos valores experimentais. A incerteza local é quantificada pela variabilidade local dos resultados da simulação. Este conjunto de imagens permite ainda visualizar o comportamento extremo das características internas ou morfológicas de um dado recurso natural e, simultaneamente, quantificar a incerteza da localização espacial dessas características.

Neste estudo foi utilizada a SSD (Soares, 2001) para efetuar a simulação da variável morfológica $P(x)$ e dos teores relativos $Y_i(x)$. Este algoritmo difere da Simulação Sequencial Gaussiana tradicional por não requerer a transformação prévia das variáveis originais para uma distribuição de tipo gaussiano.

A simulação estocástica de imagens das variáveis estudadas foi efetuada através do método de SSD, condicionada aos dados experimentais, variogramas e leis de distribuição das variáveis obtidas por KI (leis de distribuição desagrupadas).

Se designarmos genericamente por $Z(x)$ a variável estudada, a SSD é resumida nas seguintes etapas: (Soares, 2001):

- (1) Escolha de uma sequência aleatória de nós de uma malha regular que permita a visita de todos os nós.
- (2) Em cada nó x_u :
- (3) Simulação do valor de $z^s(x_u)$:

(3.1) Estimação por krigagem simples da média e da variância de $z(x)$ na localização x_u , respetivamente $z_{sk}^*(x_u)$ e $\sigma_{sk}^2(x_u)$. Reamostrar localmente o histograma de $z(x_u)$, utilizando, por exemplo, uma transformação gaussiana (ϕ) da variável de trabalho $z(x)$; cálculo de $y^*(x_u) = \phi(z^*(x_u))$;

(3.2) Geração de um número aleatório p a partir de uma lei uniforme $U(0,1)$;

(3.3) Geração do valor y^s a partir de $G(y^*(x_u), \sigma_{sk}^2(x_u))$:

$$y^s = G^{-1}(y^*(x_u), \sigma_{sk}^2(x_u), p)$$

(3.4) Retorno do valor simulado da variável primária $z^s(x_u) = \phi^{-1}(y^s)$.

3.3.4 SIMULAÇÃO POR CAMPOS DE PROBABILIDADE

O método de simulação por campos de probabilidades (*Probability Field Simulation - PFS*) apresenta uma solução na resolução de problemas que não seriam facilmente solucionados recorrendo a outros métodos de simulação, tais como a Simulação Sequencial da Indicatriz ou a Simulação Sequencial Gaussiana (Soares, 2006). A ideia-chave deste método é realizar a simulação em duas etapas separadamente (Froidevaux, 1992): numa primeira etapa são geradas para cada local a simular as leis de distribuição da variável de estudo e, numa segunda etapa, são selecionados valores dessas distribuições cumulativas, tendo por base valores espacialmente correlacionados.

A *PFS* é utilizada neste estudo para a transformação das leis de distribuição da variável proporção $P(x)$ avaliada nas sondagens em soluções com a mesma probabilidade de ocorrência e que verifiquem o modelo de continuidade espacial dos dados. Estas soluções são o ponto de partida ou informação condicionante para simular a variável $P(x)$ no depósito em estudo.

Assim, conhecidas em cada bloco intersectado por sondagens as leis de distribuição de $P(x)$, são gerados destas leis os valores simulados pretendidos com a técnica de Monte Carlo, onde os valores de probabilidade foram gerados anteriormente segundo uma lei uniforme e com o modelo de variograma pretendido.

3.3.5 QUANTIFICAÇÃO DA INCERTEZA

Um conjunto de imagens simuladas com a mesma probabilidade de ocorrência fornece uma avaliação da incerteza local se forem consideradas estatísticas locais de dispersão dos resultados como, por exemplo, a variância ou a amplitude entre quartis. A incerteza é mais bem descrita caso sejam disponibilizadas muitas imagens, todavia com um número da casa de algumas dezenas consegue-se ter percepção razoável da incerteza local associada ao modelo. A incerteza depende da distribuição e densidade espacial dos dados e das contradições entre os próprios dados, tudo sempre associado ao modelo de variograma.

4. CASO DE ESTUDO

O presente caso de estudo subdivide-se em várias etapas de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior, e com o propósito de obter o modelo de teores de cobre, zinco e prata e diluição interna do depósito mineral do Zambujal, combinando algoritmos geoestatísticos de estimação por krigagem e simulação.

Na construção do modelo de teores considerou-se necessário ter em conta a proporção entre os sulfuretos e a rocha encaixante e, por este motivo, na primeira parte do trabalho testaram-se soluções de análise de dados para a geração da variável morfológica $P(x)$ na localização das sondagens. As etapas seguintes focam-se na modelação da variável $P(x)$ e dos teores através de algoritmos de estimação geoestatística por KN e por SSD, comparando-se os resultados obtidos de forma a validar ambos os modelos.

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIADA, BIVARIADA E MULTIVARIADA

4.1.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS DE PARTIDA

Os dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho, disponibilizados pela *Lundin Mining*, encontram-se inseridos numa extensa base de dados contendo informação proveniente de 319 sondagens (figura 4.1), totalizando cerca de 58 km, algumas com origem à superfície e outras, a maioria, com origem em galerias de desenvolvimento. A informação disponível é a seguinte:

- i. Identificação ou código da sondagem;
- ii. Coordenadas da boca da sondagem (X, Y e Z) e metros furados;
- iii. Orientação da sondagem (azimute e inclinação) medida em vários pontos da sondagem e distância ao início da sondagem onde foi feita a medição;
- iv. Código correspondente ao tipo de rocha e distância ao início da sondagem do intervalo onde foi avaliada a litologia;
- v. Código correspondente ao tipo de minério (código *Orelens*) e distância ao início da sondagem do intervalo onde foi avaliado o tipo de minério;
- vi. Densidade e teores geoquímicos dos elementos em cada amostra Cu, Zn, S, Fe, Pb, Ag, Sn, Au, In, entre outros, e, mais uma vez, distância ao início da sondagem do intervalo onde foram avaliados os teores e a densidade;

Esta base de dados é auditada de forma a garantir todos os parâmetros de qualidade. São realizados ensaios de laboratório certificados QA/QC (*Quality Control/Quality Assurance*), de acordo com a norma canadiana NI-43-101, caracterizam-se os *logs* geológicos e é registada a direção e inclinação que cada sondagem toma conforme o avanço da mesma.

Em relação à quantidade de informação disponível, pode dizer-se que os elementos químicos cobre (Cu) e zinco (Zn) são os mais avaliados em relação ao conjunto dos suportes, e dado o especial interesse destes metais no depósito em estudo fica desde logo justificado o modelo de teores destes

metais. Considerou-se ainda que a prata (Ag) é um elemento que pode valorizar os concentrados como subproduto, por isso o modelo de teores, pese embora a menor representatividade da amostragem relativamente aos metais principais cobre e zinco, foi também desenvolvido para esta variável. Outra variável com potencial interesse é o elemento químico índio (In). Todavia a muito menor quantidade de determinações analíticas e o elevado número de medições abaixo do limite de deteção inviabilizou a elaboração de um modelo desta variável. Mesmo assim ainda se testaram possíveis correlações com outros elementos da paragénesis de Neves-Corvo, podendo-se concluir que o índio apresenta uma razoável correlação com o cobre.

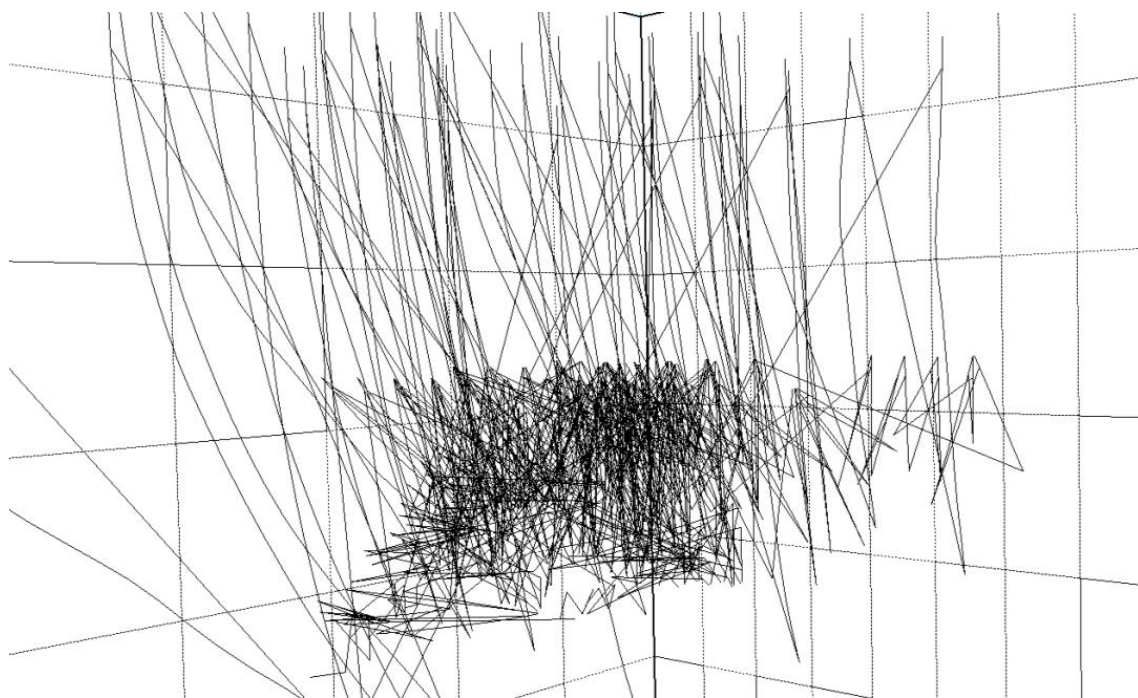


Figura 4.1 Representação tridimensional da malha de sondagens de superfície e de fundo, no depósito do Zambujal.

Refira-se que a análise de dados foi feita com os valores das observações nos suportes originais. Nas fases subsequentes da geoestatística fez-se a georreferenciação dos suportes para um intervalo igual de 2m tendo-se feito a correspondência adequada para o valor das observações (teores e densidade).

4.1.2 ANÁLISE UNIVARIADA

Realizou-se uma análise exploratória de dados da densidade e dos elementos químicos cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo. Calcularam-se os estatísticos básicos média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria que se listam na tabela 4.1 e apresentam-se os histogramas de frequências absolutas na figura 4.2. Esta análise facilitou a compreensão do comportamento de cada uma das variáveis, orientando as etapas posteriores, nomeadamente a escolha da melhor dimensão uniformizada do suporte de toda a informação nas sondagens.

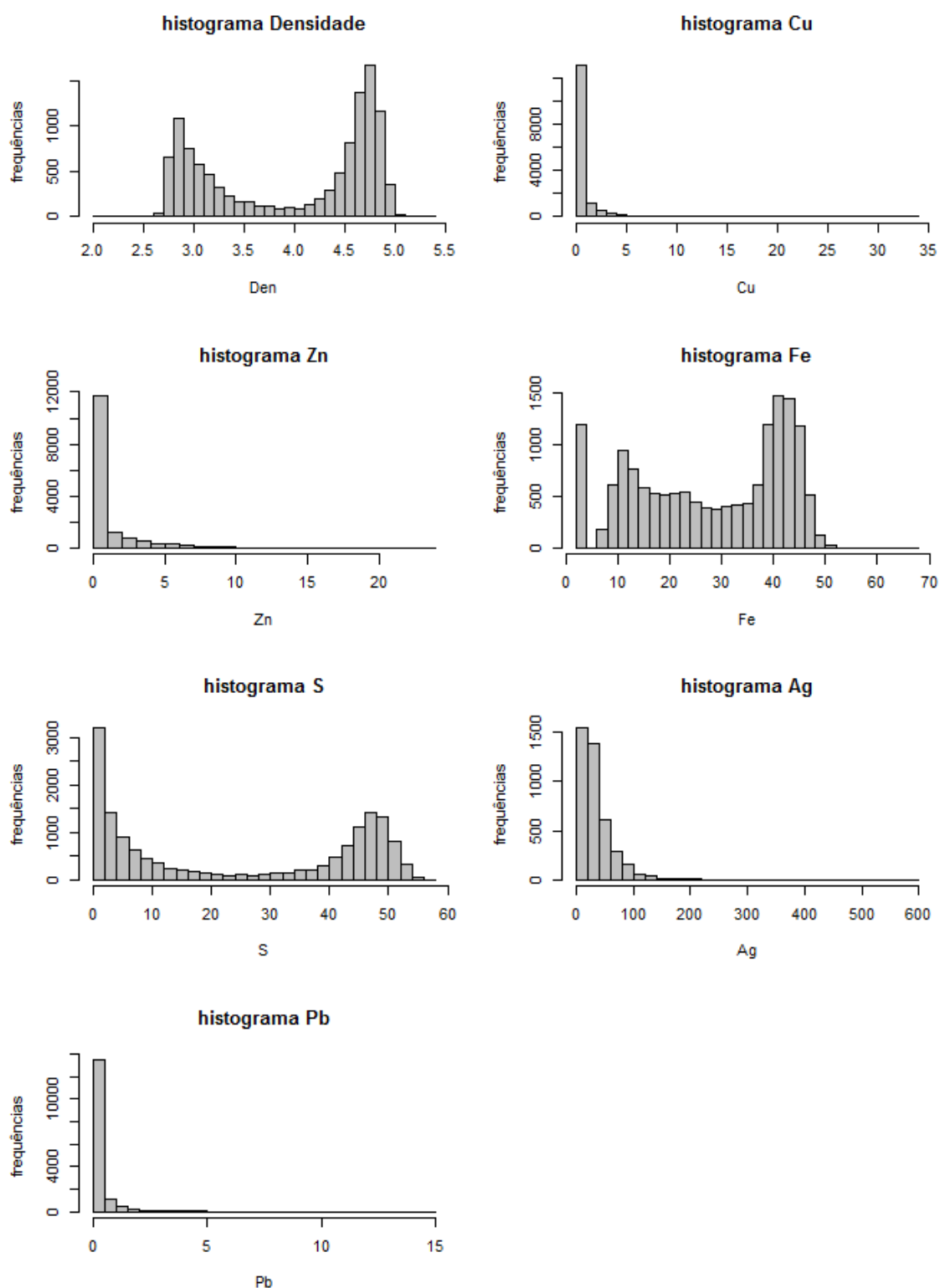


Figura 4.2 Histogramas dos dados originais: valores de densidade; teores medidos de cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo.

Tabela 4.1 – Estatísticos básicos das variáveis densidade, cobre, zinco, ferro, enxofre, chumbo e prata conforme medidos nos suportes originais.

		<i>Densidade</i>	<i>Cobre (%)</i>	<i>Zinco (%)</i>	<i>Ferro (%)</i>	<i>Enxofre (%)</i>	<i>Chumbo (%)</i>	<i>Prata (ppm)</i>
Mínimo		2,00	0,05	0,04	2,33	0,17	0,02	2,00
Máximo		5,39	33,36	23,04	66,2	56,32	15,00	590,00
Média		4,00	0,97	1,20	27,97	24,43	0,31	34,83
Mediana		4,44	0,34	0,08	30,59	20,74	0,11	26,10
Desvio Padrão		0,82	2,69	2,34	14,37	20,71	0,66	34,67
Variância		0,67	7,26	5,46	206,56	428,93	0,43	1 201,82
Coef. variação		0,21	2,79	1,95	0,51	0,85	2,11	1,00
Assimetria		-0,36	6,46	3,24	-0,31	0,06	5,68	4,54
Amostras	Nº	11 475	15 770	15 770	15 510	15 527	15 770	4 128
	(%)	73	100	100	98	98	100	26

Os teores foram analisados em suportes onde predominam o espaçamento de dois metros no minério fissural (cerca de 57% do total dos suportes) e de um metro no minério maciço (28% do total). Todas as amostras apresentam informação relativa ao teor nos metais cobre, zinco e chumbo (15770 medições), o ferro e o enxofre em quase todas (cerca de 98%), cerca de 73% das amostras apresentam medições da densidade e a prata é a variável com menor número de determinações analíticas com cerca de 26%.

Os teores médios de cobre, zinco e prata são, respetivamente 1%, 1,2% e 34ppm, as medianas são mais baixas especialmente no zinco (15x menos!) e também no cobre (3x menos). Refira-se que média é uma medida de localização central muito sensível a valores extremos e distribuições assimétricas, por esse motivo as medianas são muito mais baixas nestes dois elementos.

A dispersão dos valores da densidade é baixa, já para os teores cobre, zinco e chumbo a dispersão é elevada (ver valores do coeficiente de variação), principalmente para o cobre. A dispersão dos teores em ferro, enxofre e prata é intermédia. Realça-se que a variância é significativamente afetada por valores anómalos e por leis assimétricas o que é o caso destas variáveis.

Os histogramas ajudam a perceber a forma das leis de distribuição destas variáveis, nomeadamente a assimetria. Observa-se que o cobre, zinco, prata e chumbo possuem maioritariamente amostras com baixos teores, o que se traduz por distribuições muito assimétricas e positivas. Quanto à densidade, ferro e enxofre, verifica-se a presença de duas populações amostrais distintas: uma primeira composta por valores baixos e outra por valores altos, existindo uma região intermédia de sobreposição. Tratam-se das regiões de minérios maciços e fissurais.

4.1.3 ANÁLISE BIVARIADA

Com o objetivo de complementar a descrição univariada das variáveis, analisou-se a correlação dos teores de cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo entre si e com a densidade. Na figura 4.3 mostram-se os gráficos de dispersão de todos os pares de variáveis e na tabela 4.2 os valores dos coeficientes de correlação de Pearson (a azul) e Spearman (a preto).

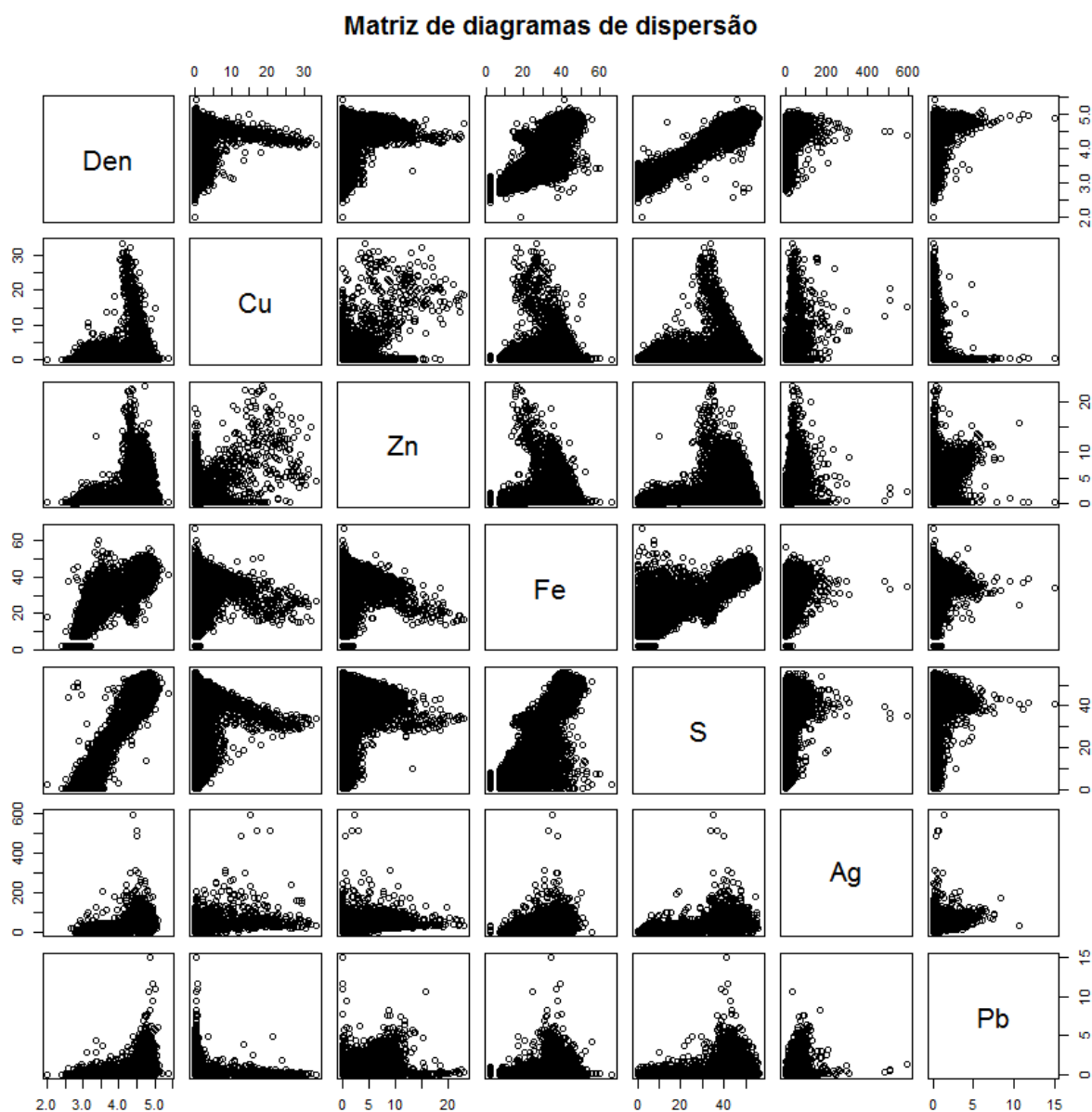


Figura 4.3 Matriz de diagramas de dispersão entre as variáveis densidade, cobre, zinco, ferro, enxofre, prata e chumbo.

Tabela 4.2 – Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson (a azul) e Spearman (a preto).

	Cobre	Chumbo	Zinco	Enxofre	Ferro	Prata	Densidade
Cobre	1	-0,444	-0,194	-0,324	-0,251	-0,029	-0,336
Chumbo	-0,238	1	0,536	0,357	0,221	0,514	0,497
Zinco	0,234	0,398	1	0,138	-0,086	0,416	0,256
Enxofre	-0,167	0,237	0,265	1	0,731	0,218	0,750
Ferro	-0,340	0,115	-0,065	0,813	1	0,078	0,646
Prata	0,228	0,303	0,206	0,220	0,097	1	0,251
Densidade	-0,124	0,322	0,332	0,939	0,799	0,234	1

Os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman são medidas de avaliação da relação entre pares de variáveis, variando entre -1 e 1, em que 1 representa uma forte correlação positiva, -1 uma forte correlação negativa e 0 uma não associação entre pares de variáveis. Com base na matriz de diagramas de dispersão (figura 4.3) e nas matrizes de correlação de Pearson e Spearman (tabela 4.2) verificam-se as seguintes relações entre pares de variáveis:

- i) A densidade apresenta excelente correlação com o enxofre e com o ferro e todos estes elementos apresentam uma forte correlação entre si. Os diagramas de dispersão mostram *clusters* com formas e associações lineares (positivas) bem definidas, onde os valores *outliers* fora do padrão global da nuvem são escassos.
- ii) Ao contrário do que seria de esperar, não se observa correlação entre o cobre e o zinco, nem entre o cobre e zinco e as restantes variáveis. O diagrama da relação entre o cobre e o zinco mostra uma população relativamente dispersa onde apenas algumas amostras parecem exibir correlação, o que não se verifica para a restante maioria.
- iii) A prata apresenta uma muito ligeira correlação com o chumbo e o zinco, aparecendo geralmente associada a estes elementos na natureza.

4.1.4 ANÁLISE MULTIVARIADA (ACP)

Posteriormente à análise uni e bivariada utilizou-se a Análise em Componentes Principais (ACP) com o propósito de melhor identificar e confirmar as afirmações já feitas. Sendo elevada a quantidade de dados em estudo, a ACP é considerada uma excelente ferramenta estatística na identificação de certos padrões nos dados de modo a reduzir a sua dimensão, com uma perda mínima de informação e uma representação simplificada dos dados. Nesta análise ACP não foram utilizados os teores da prata por estes terem sido analisados em muito menos amostras, e principalmente porque foram amostradas quase exclusivamente nos minérios maciços.

Na análise que se segue foram selecionados os três primeiros eixos (F1, F2, F3) que explicam, respetivamente, 53%, 21% e 16% da inércia ou variância total (somam 90%), perdendo-se apenas uma pequena parte de informação (10%) que é compensada pela análise de um menor número de gráficos. Na figura 4.4 mostram-se os gráficos da ACP ilustrando as correlações entre as variáveis e as componentes principais (F1/F2 e F1/F3) e na figura 4.5 mostram-se a projeção dos valores das observações nos mesmos eixos.

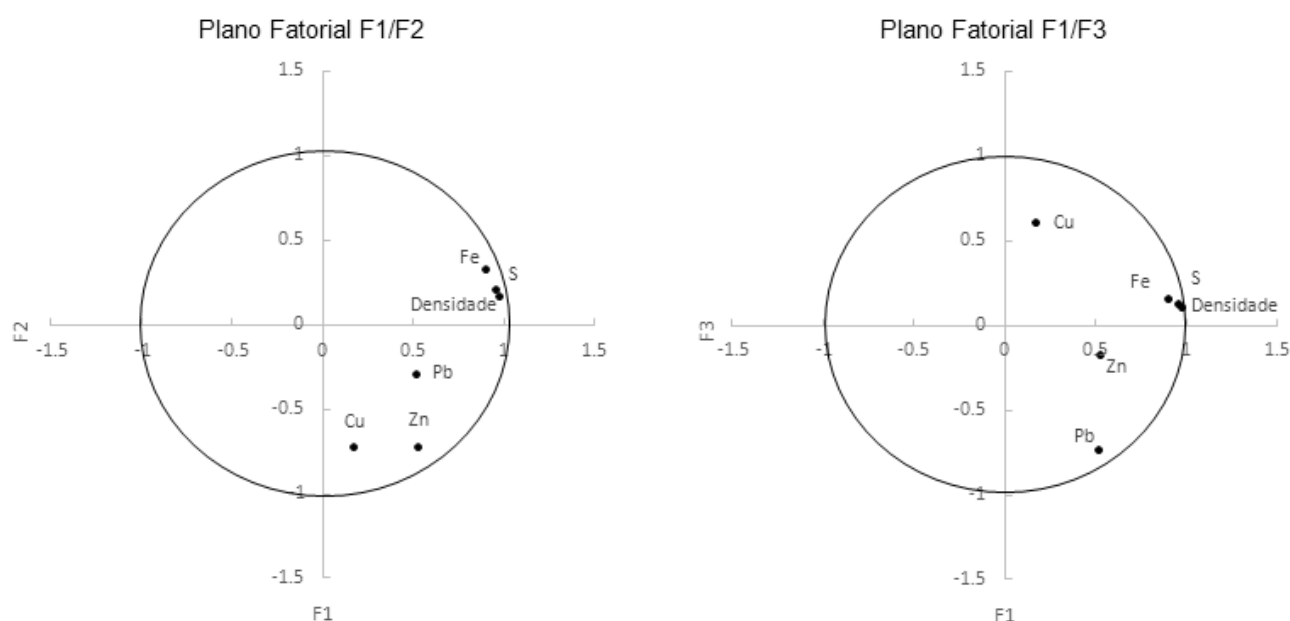


Figura 4.4 Gráficos ACP com representação das correlações entre as variáveis densidade, cobre, zinco, enxofre, ferro e chumbo e as componentes principais F1/F2 e F1/F3.

Observando o gráfico correspondente às componentes principais F1/F2 (figura 4.4, à esquerda), a densidade, o Fe e o S destacam-se por estarem muito bem explicados na componente principal F1 e o Cu e o Zn apresentam-se razoavelmente bem explicados na componente principal F2. Em relação ao gráfico das componentes principais F1/F3, o Pb mostra ter boa correlação com F3 o que significa que é a variável menos correlacionada com as restantes. Os gráficos confirmam existir elevada correlação entre a densidade e as variáveis S e Fe e estas entre si, já o Zn e Cu pouca ou nenhuma correlação com as restantes variáveis e com a densidade.

A projeção dos valores das observações nas componentes principais F1/F2 e F1/F3 (ver figura 4.5) mostram uma única população de observações, mas onde as regiões de minério R_M e R_F aparecem diferenciadas pelo eixo F1, ou seja, são as variáveis Fe, S e densidade que discriminam estas duas regiões. À direita, na região dos minérios maciços, a nuvem de pontos subdivide-se em duas, uma estará mais relacionada com o enriquecimento em zinco e outra com o enriquecimento em cobre. Esta correspondência também é observada na projeção F1/F3.

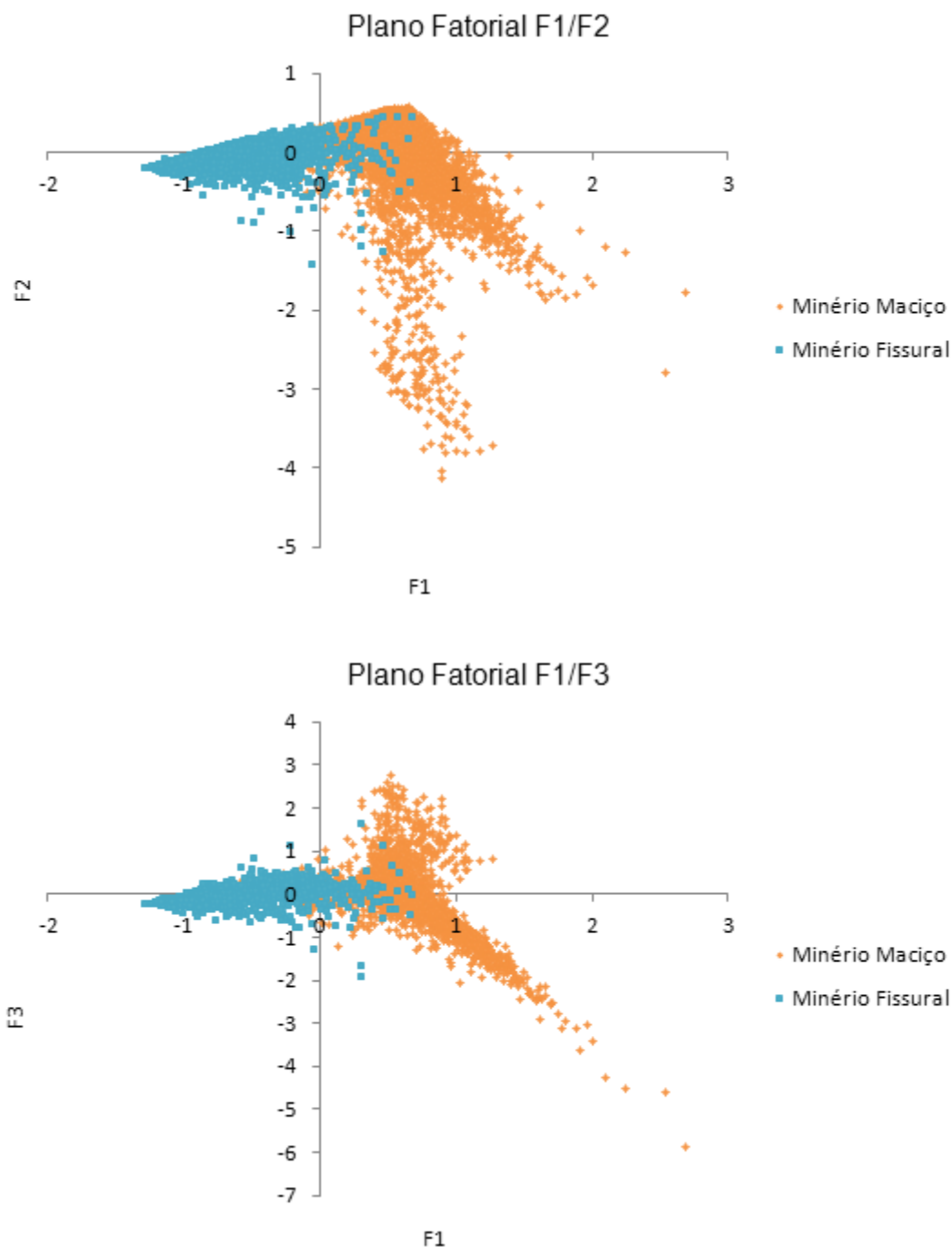


Figura 4.5 Gráficos ACP com a projeção das observações por tipo de minério maciço ou minério fissural nas componentes principais F1/F2 e F1/F3.

4.2 MODELO MORFOLÓGICO DE BAIXA RESOLUÇÃO

Na construção deste modelo morfológico consideram-se as seguintes etapas: (a) seleção de perfis; (b) digitalização das fronteiras das regiões mineralizadas R_M e R_F (linhas poligonais) tendo em atenção os dados das sondagens e o conhecimento geológico estrutural; (c) interpolação linear das três superfícies (topo de R_M , base de R_M coincidente com o topo de R_F e base de R_F ; (d) conversão do modelo vetorial

dos dois corpos mineralizados para um modelo de blocos das regiões R_M e R_F . As fronteiras exteriores do depósito ficam definidas nesta etapa e condicionam decisivamente a quantidade de minério.

4.2.1 SELEÇÃO DE PERFIS E DIGITALIZAÇÃO DOS LIMITES DA MINERALIZAÇÃO NOS PERFIS SELECIONADOS

A digitalização de perfis iniciou-se com a rotação dos dados das sondagens de 34° no sentido contrário aos ponteiros do relógio. Esta rotação dos dados simplificou a seleção dos perfis e otimizou a malha de blocos e o número de blocos. A digitalização das secções efetuou-se do centro para a periferia do depósito, porque a quantidade de informação é mais abundante no centro do jazigo. Os perfis foram considerados aproximadamente paralelos, mas a distância entre perfis não é constante. Nas zonas onde predomina minério maciço o espaçamento entre perfis é maior, sendo menor nas regiões onde a presença de minério fissural prevalece.

Foram digitalizadas linhas poligonais abertas em 22 perfis. Em cada perfil desenhou-se o topo da região de minério maciço, a base da região de minério maciço (correspondente à fronteira com a região de minério fissural) e, inferiormente, a base da região de minério fissural. Esta etapa é de natureza meramente interpretativa, pelo que vai depender da experiência do executante e do grau de conhecimento relativamente ao depósito em questão. Na figura 4.6 mostra-se a digitalização em perfil intermédio dos limites das regiões R_M (maciço no topo) e R_F (fissural na base) utilizando dados das sondagens de avaliação e prospeção.

4.2.2 INTERPOLAÇÃO PARA A CONSTRUÇÃO DOS SÓLIDOS 3D

Após a digitalização dos limites das regiões mineralizadas nos 22 perfis a 2D passou-se à construção dos sólidos 3D das regiões mineralizadas através de algoritmos de interpolação linear (triangulação). Foram geradas três superfícies que delimitam as regiões R_M e R_F (figura 4.7): superfície do topo do minério maciço (vermelho), superfície de transição do minério maciço para o minério fissural (amarelo) e superfície da base do minério fissural (azul). As superfícies delimitam completamente os dois volumes.

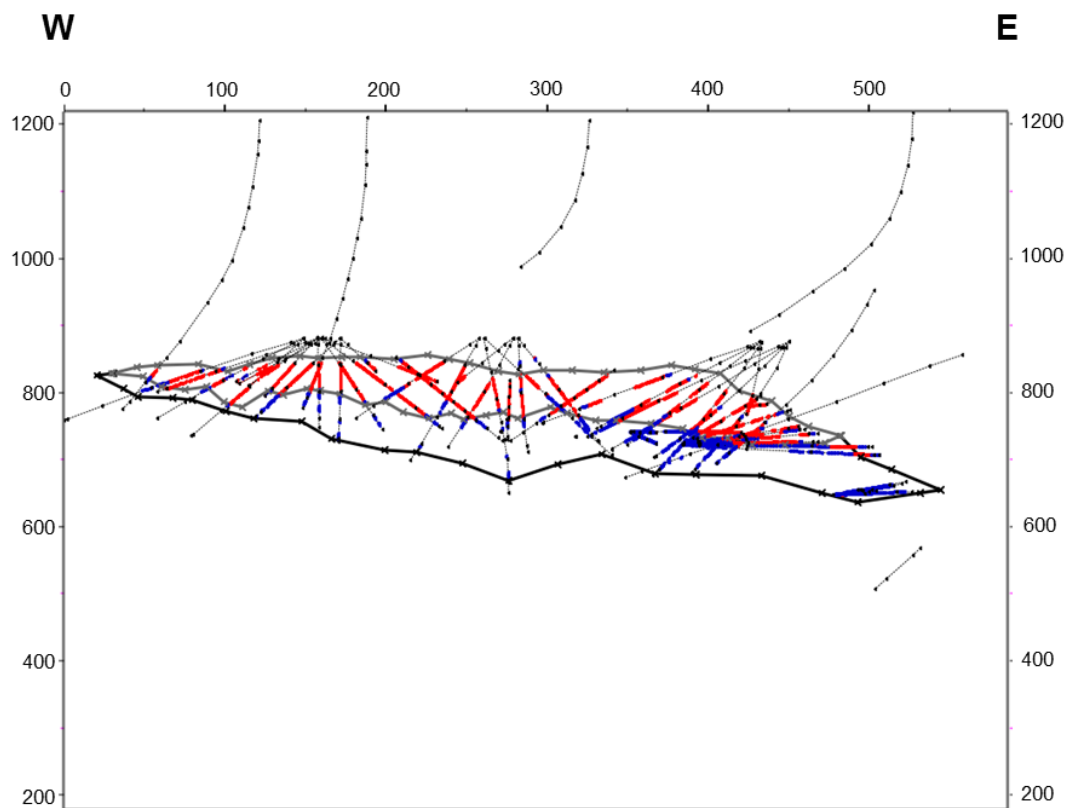


Figura 4.6 Fase de digitalização em perfil intermédio dos limites das regiões R_M (maciço no topo) e R_F (fissural na base) utilizando dados das sondagens de prospeção e avaliação. Os troços de sondagem a vermelho assinalam minérios maciços e a azul os minérios fissurais.

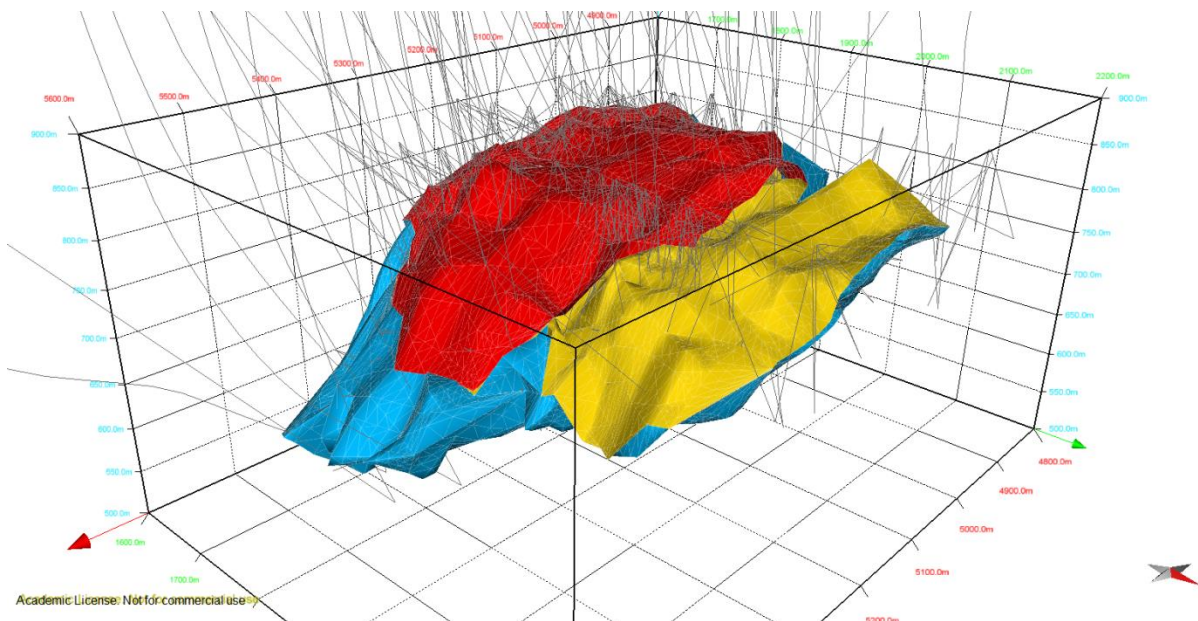


Figura 4.7 Representação 3D das superfícies que delimitam o topo e base das regiões R_M e R_F : superfície do topo do minério maciço (vermelho), superfície de transição do minério maciço para o minério fissural (amarelo) e superfície da base do minério fissural (azul).

4.2.3 CONVERSÃO PARA UM MODELO DE BLOCOS

A etapa final consiste na transformação dos sólidos 3D para um modelo de blocos, isto é, a transformação do modelo vetorial num modelo com estrutura matricial. Na tabela 4.3 mostram-se os parâmetros geométricos da malha de blocos que foi considerada neste estudo. Na figura 4.9 mostram-se as duas regiões na malha de blocos já transformada.

Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos da malha de blocos de avaliação: coordenadas dos blocos início e fim, dimensão do bloco e número de blocos nas três direções ortogonais.

Direção eixo coordenado	Coordenadas do ponto central do bloco (m)		Dimensão do bloco (m)	Número de blocos
	Bloco inferior esquerdo	Bloco superior direito		
X	4880	5560	2	340
Y	1650	2156	2	253
Z	530	880	2	175

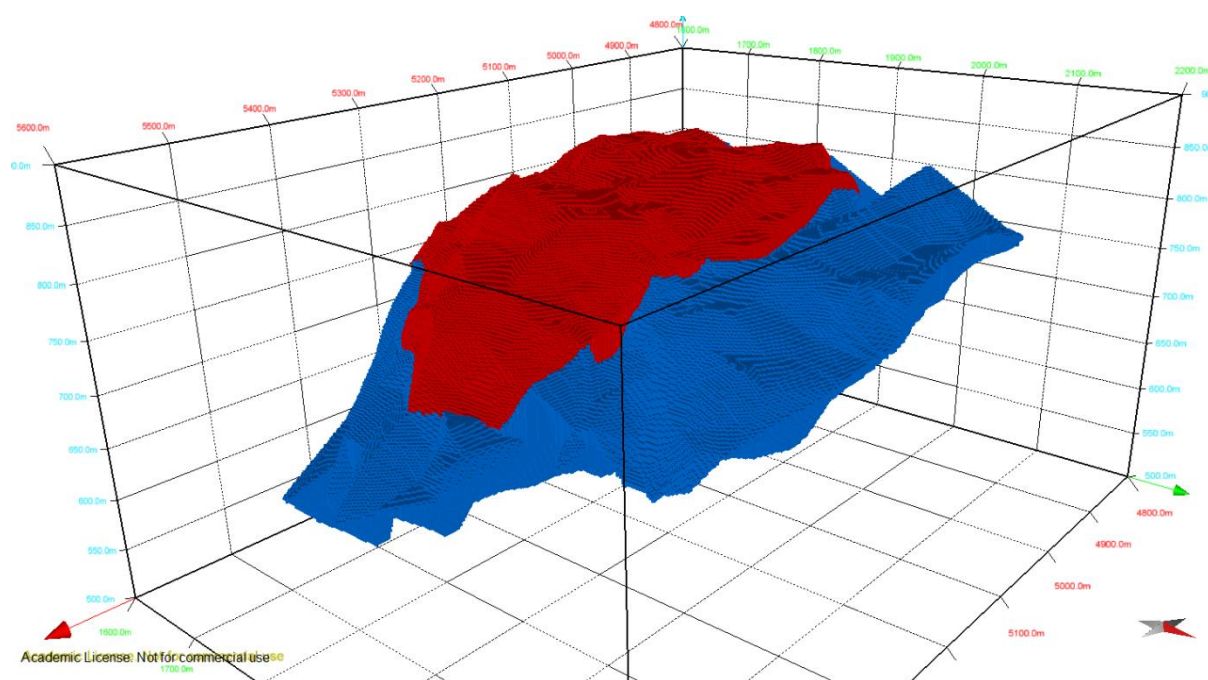


Figura 4.8 Representação matricial do modelo morfológico de baixa resolução com o minério maciço no topo (vermelho) e os minérios fissurais na base (azul).

4.3 GERAÇÃO DA LEI DE DISTRIBUIÇÃO DA VARIÁVEL $P(x)$ NAS SONDAGENS

Esta etapa envolveu a avaliação da variável $P(x)$ na localização das sondagens e, posteriormente, a análise da continuidade espacial e simulação da variável $P(x)$. Constitui a primeira etapa da construção do designado modelo morfológico de alta resolução. Na tabela 4.4 visualizam-se os principais minerais metálicos da paragénesis do depósito do Zambujal e as respectivas propriedades densidade e

percentagem de metal calculados com base na fórmula química e nos pesos atômicos dos elementos químicos envolvidos nos minerais.

Tabela 4.4 – Minerais principais (sulfuretos) do depósito do Zambujal, densidade e percentagem de metal conforme a fórmula química e os pesos atômicos dos elementos envolvidos.

Sulfuretos e fórmula química	Densidade	Ferro (%)	Enxofre (%)	Cobre (%)	Zinco (%)	Chumbo (%)
Pirite, FeS_2	5,02	47	53	-	-	-
Calcopirite, CuFeS_2	4,20	30	35	35	-	-
Esfalerite, ZnS	4,00	-	33	-	67	-
Galena, PbS	7,50	-	13	-	-	87
Rocha encaixante	2,80	-	-	-	-	-

Aplicando o procedimento explicado no capítulo 3.2.2, geraram-se 10 soluções da variável $P(x)$ para cada amostra. É expectável que, caso os valores de $P(x)$ sejam próximos de zero, a amostra naquele local seja composta unicamente por rocha encaixante; por outro lado, se os valores de $P(x)$ são intermédios, a amostra apresenta mineralização fissural (sulfuretos e rocha encaixante); caso os valores de $P(x)$ se encontrem perto de 1, significa que a amostra é constituída unicamente por sulfuretos, sem a presença de rocha encaixante, ou seja, é minério maciço.

A figura 4.9 apresenta o histograma dos valores de $P(x)$ obtidos que variam entre 0,01 e 0,99. O gráfico mostra existirem duas populações distintas: uma, em que os valores de $P(x)$ são baixos – mineralização fissural –, e uma outra em que os valores de $P(x)$ são elevados – sulfuretos maciços. A população de valores mais altos exibe menor dispersão do que a população de valores mais baixos. A transição parece ser rápida porque a frequência de valores intermédios, por exemplo, em torno de 0,6, é baixa.

A figura 4.10 apresenta os histogramas cumulativos da variável $P(x)$ por tipo de minério, maciço ou fissural (na classificação proposta pela Somincor). Os histogramas cumulativos mostram que na região onde existem maioritariamente sulfuretos, no topo do depósito, os valores de $P(x)$ são elevados (curva a vermelho), enquanto na região subjacente, onde a mineralização é do tipo fissural, os valores de $P(x)$ são muito mais baixos devido à presença de rocha encaixante. Refira-se que cerca de 10% dos valores classificados como minérios maciços exibe valores de $P(x)$ baixos, inferiores a 0,5, o que evidencia a dificuldade da classificação de minérios em zonas de transição litológica.

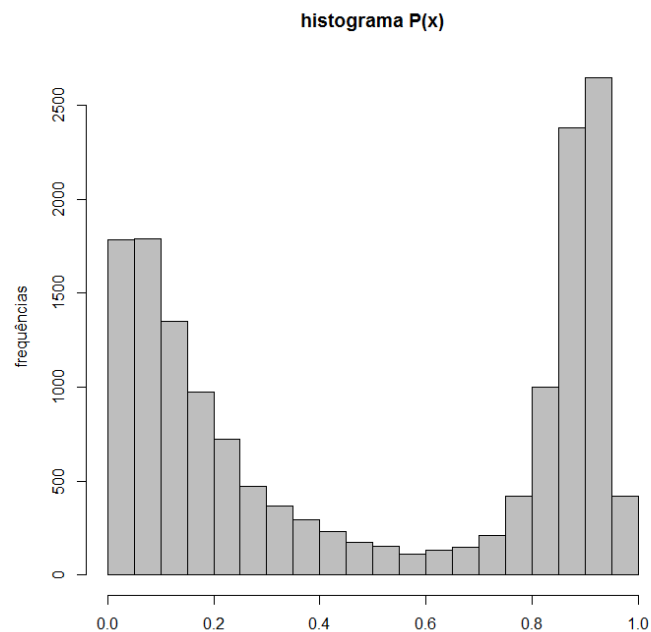


Figura 4.9 Histograma de frequências relativas dos valores calculados de $P(x)$ onde são observadas duas populações de observações.

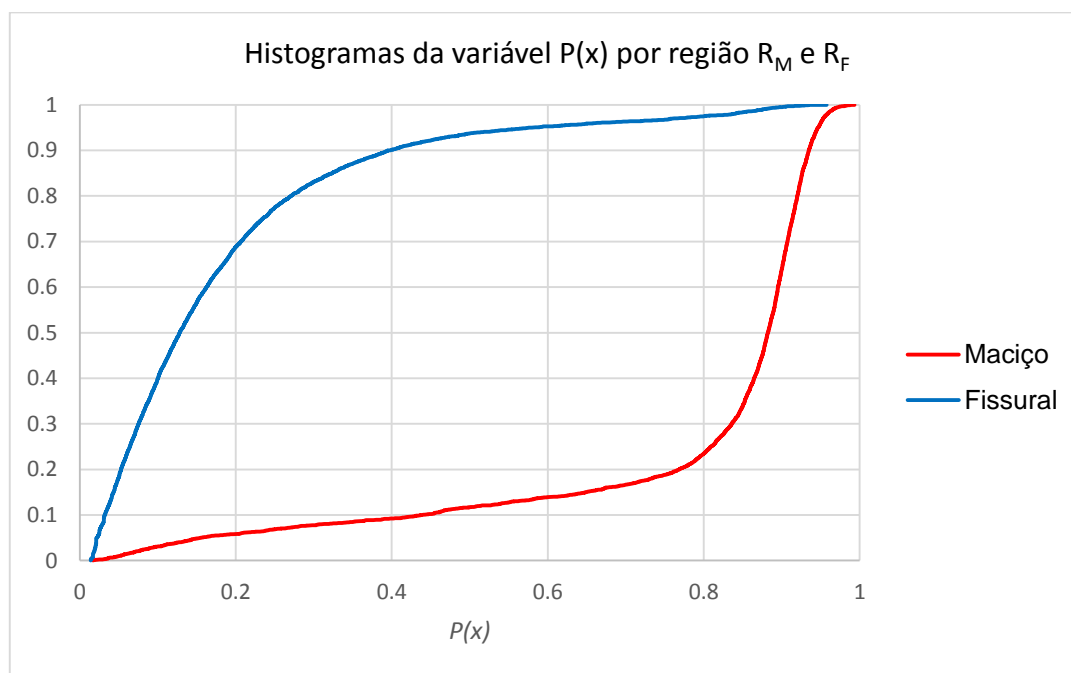


Figura 4.10 Histogramas cumulativos condicionais de $P(x)$ por tipo de minério, maciço e fissural.

Para mostrar mais detalhadamente os resultados obtidos para a variável morfológica $P(x)$, na figura 4.11 mostram-se gráficos das variáveis $P(x)$, densidade $D(x)$ e teores em cobre e zinco em função da cota para uma sondagem SN18B que atravessa as duas formações e cujo comportamento é representativo do conjunto das sondagens. Os valores de $P(x)$ representados no gráfico são os valores médios calculados a partir das 10 soluções obtidas.

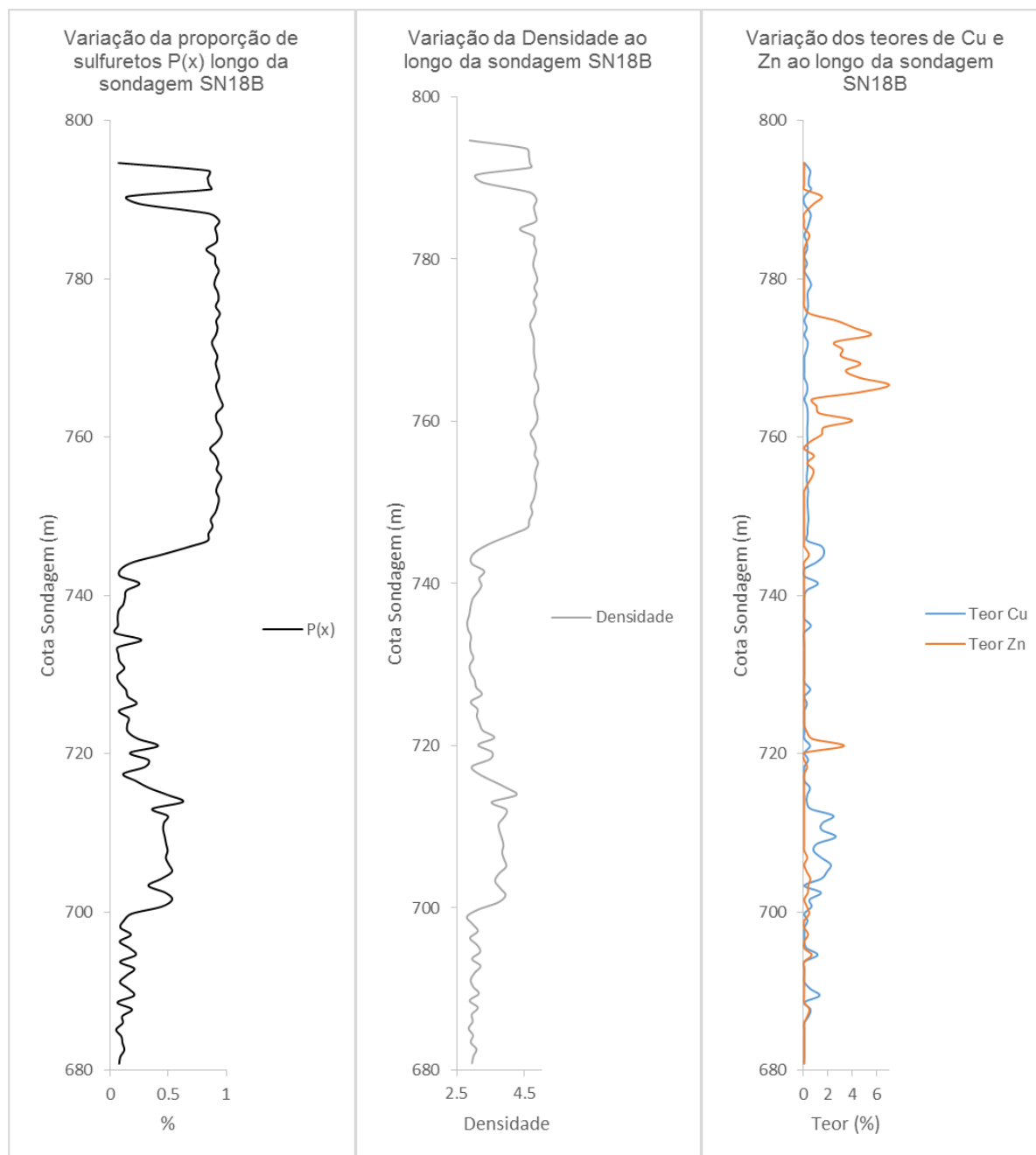


Figura 4.11 Representação da variável $P(x)$, densidade $D(x)$ e teores de cobre e zinco em função da cota para a sondagem SN18B.

Os valores da sondagem SN18B, do topo para a base, mostram que, para as cotas mais elevadas ou superiores a 745m, os valores obtidos para $P(x)$ são próximos de 1 a que correspondem densidades superiores a 4,5. No topo da formação, a transição entre o minério e a rocha encaixante é brusca existindo mesmo zonas de mistura destas litologias. À cota 745 os minérios maciços passam a fissurais e tanto a densidade como os valores de $P(x)$ caem muito rapidamente confirmando uma transição brusca entre o minério maciço e o minério fissural. Nesta zona a percentagem de sulfuretos é baixa mas exibe alguma variação e em alguns locais chega a 0,5. A correlação entre a variável $P(x)$ e a

densidade é muito relevante mas as duas curvas não são exatamente paralelas e existem variações locais que resultam da combinação com outras variáveis. Relativamente aos teores em cobre e zinco, estes variam em profundidade e aparentam independência do resultado obtido para a variável $P(x)$. É de relembrar que a variável $P(x)$ soma a proporção de todos os sulfuretos e não só os de zinco e cobre.

Importa ainda mostrar qual a variabilidade das soluções obtidas para a variável $P(x)$. Para o efeito, para cada observação calculou-se a diferença entre o valor máximo e mínimo das soluções obtidas (medida de dispersão) e apresenta-se o histograma destas diferenças. O histograma constata-se que as maiores diferenças são inferiores a 0,09 e que a amplitude mais frequente é de 0,02. Em síntese, as soluções obtidas para $P(x)$ exibem baixa variabilidade local, ainda assim é preferível trabalhar estes valores em termos de lei de distribuição e não em termos de um valor médio. A utilização de uma lei de distribuição obriga a que sejam gerados por simulação valores para $P(x)$ na localização das amostras a que se segue a simulação para todo o depósito.

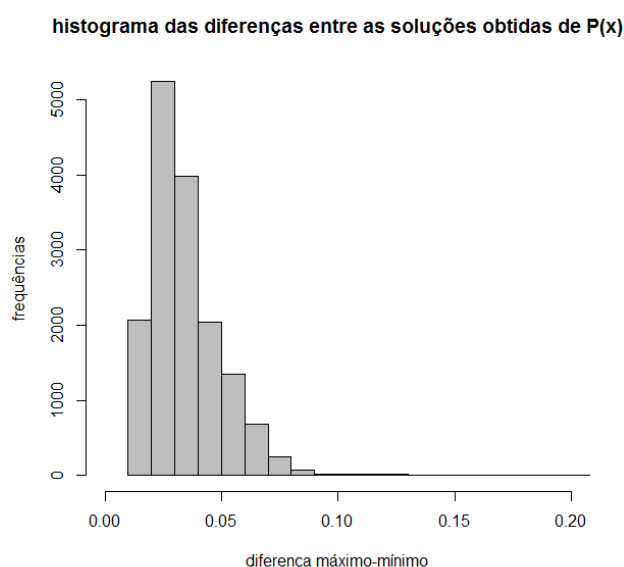


Figura 4.12 Histograma de frequências absolutas das diferenças entre os máximos e mínimos das 10 soluções de $P(x)$ geradas em cada amostra.

4.4 VARIOGRAFIA E AJUSTE DE MODELOS TEÓRICOS

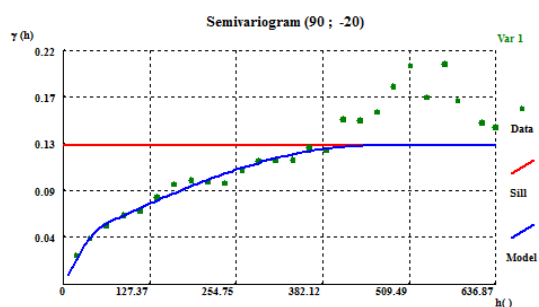
Os métodos geoestatísticos de estimação e simulação requerem o cálculo de variogramas experimentais para vários intervalos de distância e direções específicas no espaço. As direções são determinadas pela estrutura geológica do objeto de estudo e, de todas as que são testadas, o ajustamento das funções teóricas concentra-se em duas a três direções que melhor representam potenciais anisotropias. As direções também são escolhidas em função da orientação dos dados disponíveis. Refira-se que os ângulos azimutais apresentados daqui para a frente têm em consideração a rotação de 34° já referida.

Após a realização de vários testes, concluiu-se que as três direções que maximizavam a representatividade dos pares de pontos para o cálculo dos variogramas experimentais, e que se espera que apresentem os resultados mais assertivos são as seguintes:

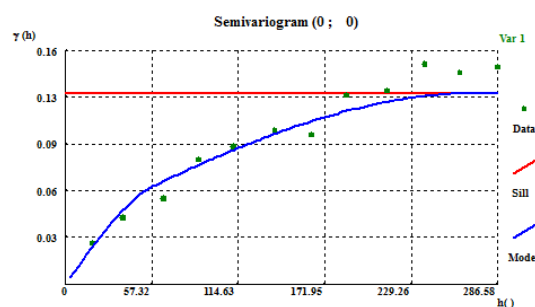
1. **Direção W-E e 20° de inclinação (90°; -20°):** direção paralela aos perfis e paralela à atitude da massa mineralizada (com 20° de inclinação para Este). É a direção com o maior número de par de pontos e com maiores amplitudes.
2. **Direção N-S, horizontal (0; 0):** direção horizontal e perpendicular à direção principal, intersecando os perfis.
3. **Direção W-E e 70° de inclinação (90°; 70°):** direção paralela aos perfis, e perpendicular à primeira. Intersecta na perpendicular as duas mineralizações, maciço e fissural, apresentando os menores valores de amplitude dos variogramas.

Foram calculados os variogramas experimentais das oito variáveis intervenientes no estudo: proporção de sulfuretos na matriz $P(x)$, densidade $D(x)$, teores em cobre $Z_{Cu}(x)$, zinco $Z_{Zn}(x)$ e prata $Z_{Ag}(x)$, e os teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$. Para o cálculo dos variogramas, os teores relativos foram obtidos dividindo os teores normais medidos nas sondagens pelo valor médio obtido para a variável $P(x)$. Os resultados dos variogramas e os modelos teóricos ajustados apresentam-se nas figuras 4.13 a 4.20. Na tabela 4.5 sintetizam-se os parâmetros dos modelos ajustados para todas as variáveis. Importa referir que os valores dos teores relativos resultam da divisão dos teores pela variável $P(x)$ e, em nenhum caso, desta divisão resultaram teores de cobre e zinco com valores impossíveis de ocorrer no mineral (acima de 35% de cobre na calcopirite e acima de 67% de zinco da esfalerite).

$$SPH_1(C_1 = 0,037; a_1 = 60m) + SPH_2(C_2 = 0,091; a_2 = 450m)$$



$$SPH_1(C_1 = 0,037; a_1 = 60m) + SPH_2(C_2 = 0,091; a_2 = 270m)$$



$$SPH_1(C_1 = 0,037; a_1 = 60m) + SPH_2(C_2 = 0,091; a_2 = 60m)$$

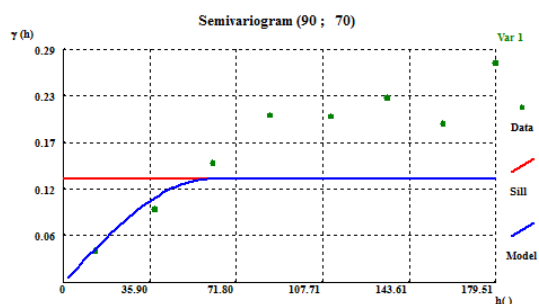


Figura 4.13 Variogramas experimentais da variável $P(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

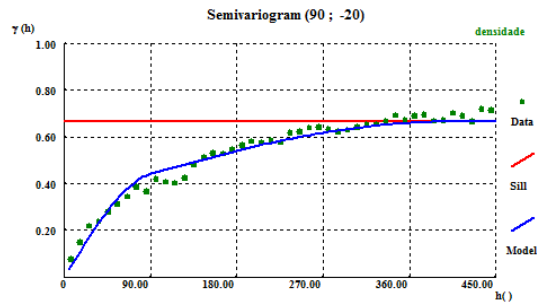
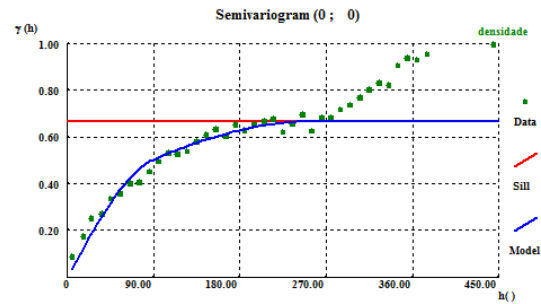
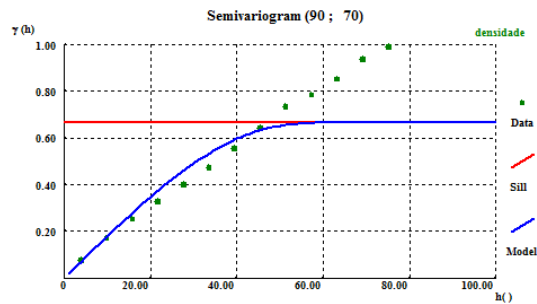
$\text{SPH}_1(C_1 = 0,333; a_1 = 90\text{m}) + \text{SPH}_2(C_2 = 0,333; a_2 = 400\text{m})$

 $\text{SPH}_1(C_1 = 0,333; a_1 = 90\text{m}) + \text{SPH}_2(C_2 = 0,333; a_2 = 250\text{m})$

 $\text{SPH}_1(C_1 = 0,333; a_1 = 60\text{m}) + \text{SPH}_2(C_2 = 0,091; a_2 = 60\text{m})$


Figura 4.14 Variogramas experimentais da variável $D(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

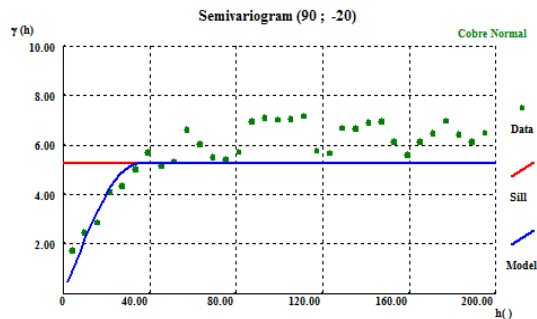
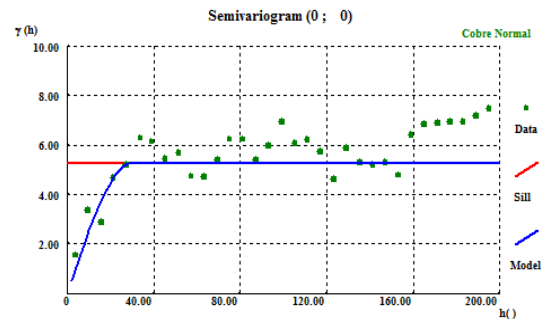
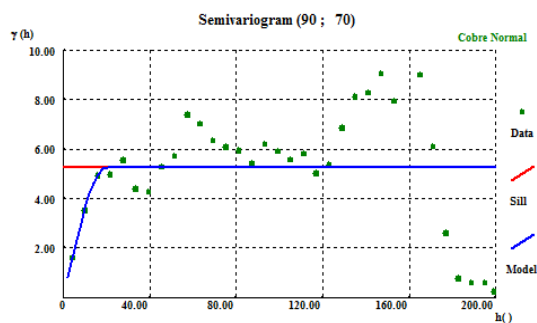
 $\text{SPH}_1(C_1 = 5,285; a_1 = 35\text{m})$

 $\text{SPH}_1(C_1 = 5,285; a_1 = 30\text{m})$

 $\text{SPH}_1(C_1 = 5,285; a_1 = 20\text{m})$


Figura 4.15 Variogramas experimentais do teor de cobre $Z_{Cu}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

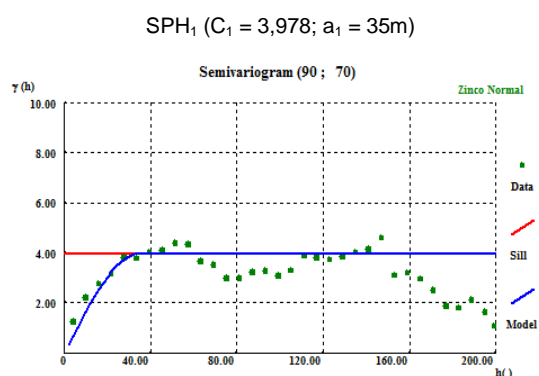
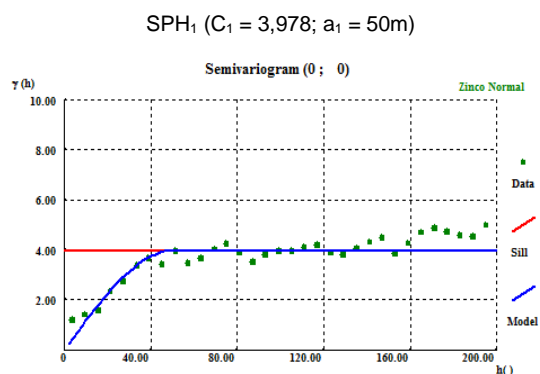
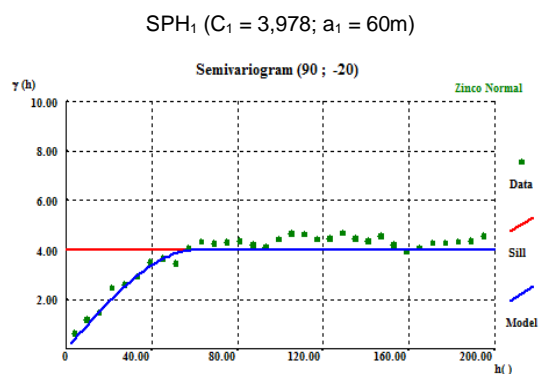


Figura 4.16 Variogramas experimentais do teor de zinco $Z_{Zn}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

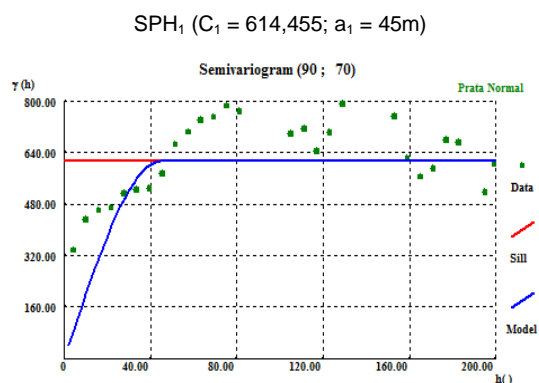
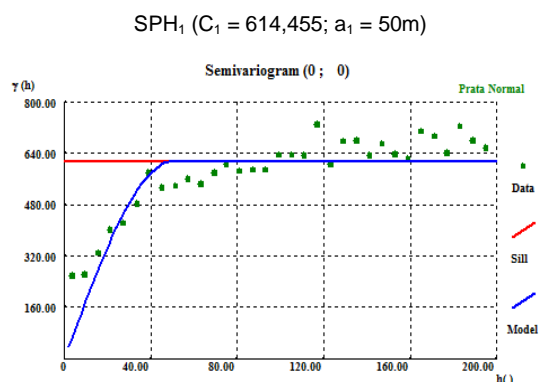
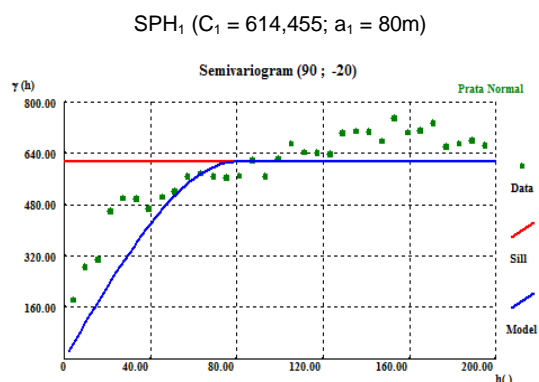


Figura 4.17 Variogramas experimentais do teor de prata $Z_{Ag}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

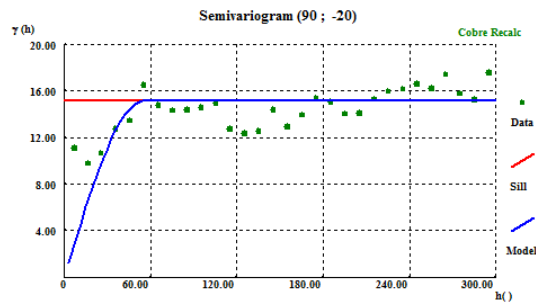
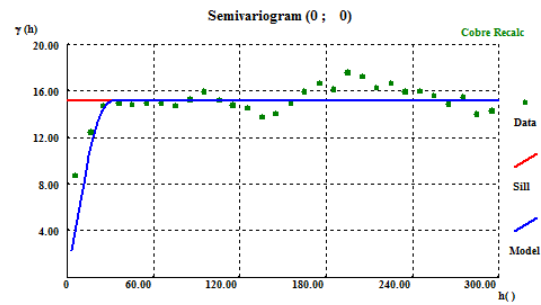
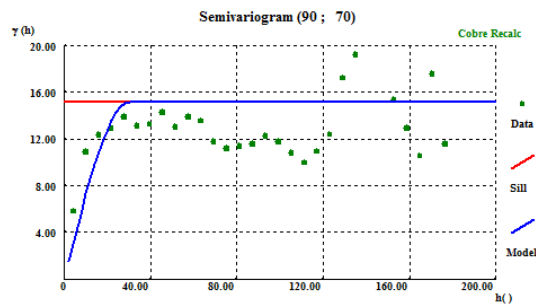
SPH₁ ($C_1 = 15,127$; $a_1 = 55m$)SPH₁ ($C_1 = 15,127$; $a_1 = 30m$)SPH₁ ($C_1 = 15,127$; $a_1 = 30m$)

Figura 4.18 Variogramas experimentais do teor relativo de cobre $Y_{Cu}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

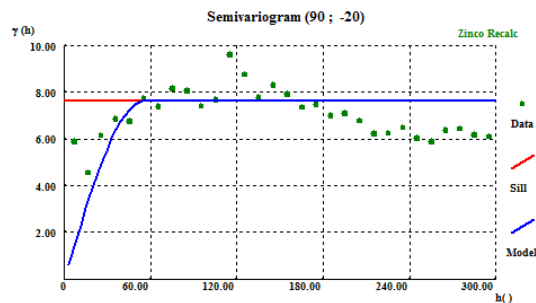
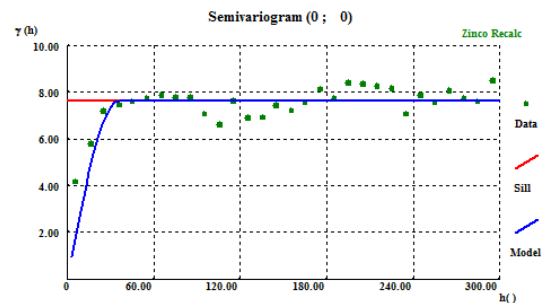
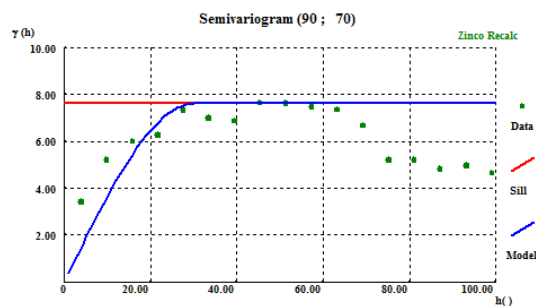
SPH₁ ($C_1 = 7,612$; $a_1 = 60m$)SPH₁ ($C_1 = 7,612$; $a_1 = 35m$)SPH₁ ($C_1 = 7,612$; $a_1 = 30m$)

Figura 4.19 Variogramas experimentais do teor relativo de zinco $Y_{Zn}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

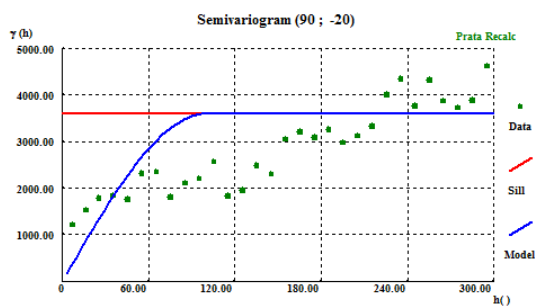
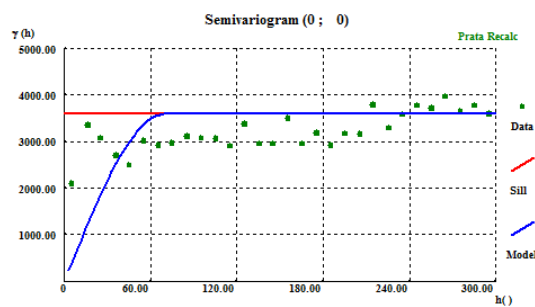
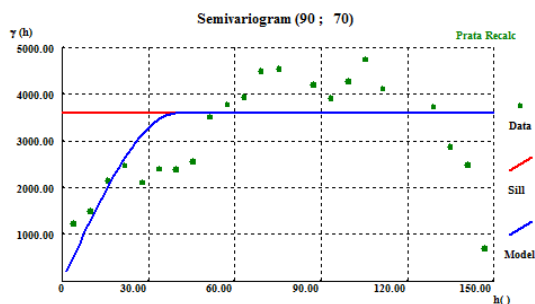
$\text{SPH}_1 (C_1 = 3598,551; a_1 = 100\text{m})$

 $\text{SPH}_1 (C_1 = 3598,551; a_1 = 70\text{m})$

 $\text{SPH}_1 (C_1 = 3598,551; a_1 = 45\text{m})$


Figura 4.20 Variogramas experimentais do teor relativo de prata $Y_{Ag}(x)$ calculados nas três direções preferenciais: direção W-E 20° E (90; -20), direção N-S (0; 0) e direção W-E 70° W (90; 70).

Tabela 4.5 – Tabela síntese dos parâmetros teóricos dos modelos de variogramas ajustados.

Variável	C_0	1ª estrutura				2ª estrutura				Modelo
		C_1	a_1 (m)	a_1 (m)	a_1 (m)	C_2	a_2 (m)	a_2 (m)	a_2 (m)	
$P(x)$	0	0,037	60	60	60	0,091	450	270	60	Esférico
$D(x)$	0	0,333	90	90	60	0,333	400	250	60	Esférico
$Z_{Cu}(x)$	0	5,285	35	30	20	-	-	-	-	Esférico
$Z_{Zn}(x)$	0	3,978	60	50	35	-	-	-	-	Esférico
$Z_{Ag}(x)$	0	614,455	80	50	45	-	-	-	-	Esférico
$Y_{Cu}(x)$	0	15,127	55	30	30	-	-	-	-	Esférico
$Y_{Zn}(x)$	0	7,612	60	35	30	-	-	-	-	Esférico
$Y_{Au}(x)$	0	3598,551	100	70	45	-	-	-	-	Esférico

Relativamente ao cálculo e ajustamento dos variogramas experimentais importa referir que:

- 1) Todas as variáveis exibem anisotropia geométrica, embora em graus diferentes. Não foram observados efeitos de pepita o que significa que a densidade da amostragem é suficiente para o cálculo dos variogramas.
- 2) A direção de maior continuidade espacial para todas as variáveis é a direção W-E com inclinação de 20° para E, segue-se a direção horizontal N-S (que cruza os perfis) de continuidade intermédia e finalmente a direção de menor continuidade perpendicular à estrutura W-E com 70° de inclinação.
- 3) Todos os variogramas experimentais obtidos são inequívocos nas tendências de continuidade espacial, mas os variogramas das variáveis $P(x)$ e $D(x)$ são os de melhor qualidade.
- 4) Para as variáveis $P(x)$ e $D(x)$ (variáveis correlacionadas) observam-se duas estruturas na direção principal, uma primeira de baixa amplitude (60 e 90 metros, respetivamente) e uma segunda de muito maior amplitude (450 e 400 metros). Na direção de menor continuidade espacial a segunda estrutura desaparece nas duas variáveis. Pode referir-se que $P(x)$ e $D(x)$ apresentam elevada continuidade na direção principal (90; -20), o que é expectável visto que esta direção é coincidente com o plano de maior extensão da mineralização. A presença de duas estruturas estará relacionada com a morfologia da sobreposição dos dois corpos mineralizados do depósito do Zambujal.
- 5) Analisando os variogramas dos teores $Z_{Cu}(x)$, $Z_{Zn}(x)$ e $Z_{Ag}(x)$, as amplitudes na direção principal dos teores de cobre, zinco e prata são, respetivamente, 35m, 60m e 80m. Na direção de menor amplitude, a anisotropia tem a magnitude aproximada de duas vezes. Para os dois primeiros teores o ajustamento é inequívoco, já quanto à prata podem subsistir algumas dúvidas na definição das amplitudes porque o comportamento dos pontos do variograma experimental não segue totalmente a forma das funções de tipo esférico ou exponencial.
- 6) Relativamente aos teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$, as amplitudes na direção principal dos teores relativos de cobre, zinco e prata são de 55m, 60m e 100m, respetivamente. Estas amplitudes são ligeiramente superiores às dos teores simples e a qualidade dos pontos do variograma experimental é semelhante. Assim, geração e modelação destas variáveis auxiliares não é comprometida na fase de cálculo e ajustamento dos variogramas experimentais que se mantém a justificação de vantagem na utilização destas variáveis pelo acréscimo de informação do modelo, nomeadamente, a quantificação da diluição interna.

4.5 ESTIMAÇÃO POR KRIGAGEM NORMAL DOS VALORES MÉDIOS PARA O DEPÓSITO DE TODAS AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

Previamente às simulações das variáveis $P(x)$ e teores relativos em cobre zinco e prata, estimou-se por KN todas as variáveis estudadas, tendo-se analisado os resultados conforme estes dizem respeito às regiões R_M ou R_F . Na tabela 4.6 sintetizam-se os resultados obtidos, respetivamente o volume de minério (quantitativo obtido da contagem de blocos do modelo de baixa resolução que pertencem a

cada região), a densidade média, a tonelagem de minério (volume x densidade média), o volume de sulfuretos na matriz, e as quantidades de metal em cobre, zinco e prata. As quantidades de metal foram obtidas de duas formas, a primeira pela estimação dos teores e a segunda pela estimação dos teores relativos que se multiplicam no final pela variável proporção de estimada de sulfuretos. A krigagem tem o efeito de desagregação dos dados, por essa razão os valores médios são diferentes dos observados nas sondagens.

Tabela 4.6 – Síntese dos resultados obtidos relativamente à quantidade de minério (volume e tonelagem) e quantidades de metal obtidas pela estimação de teores e estimação de teores relativos por krigagem normal (KN). Os resultados são apresentados separados por região R_M , R_F e $R_M + R_F$.

		R_M	R_F	$R_M + R_F$
Modelo Morfológico (Baixa Resolução)	Número de Blocos	737.049	1.802.404	2.539.453
	Volume de Minério (m³)	5.896.392	14.419.232	20.315.624
	$[D(x)]^{KN}$	4,394	3,125	3,497
	Tonelagem	25.906.388	45.065.868	70.972.256
Modelo Morfológico Variável $P(x)$	$[P(x)]^{KN}$	0,756	0,184	0,350
	Volume de Sulfuretos (m³)	4.457.672	2.653.139	7.110.468
Cobre (Cu)	$[Z_{Cu}(x)]^{KN}$	1,050	0,549	0,695
	Toneladas Cu [1]	272.017	247.502	519.519
	$[Y_{Cu}(x)]^{KN}$	1,465	3,289	2,763
	$[Y_{Cu}(x)]^{KN} \cdot [P(x)]^{KN}$	1,051	0,545	0,692
	% desvio	0,048	-0,697	-0,370
	Toneladas de Cu [2]	272.147	245.789	517.936
Zinco (Zn)	$[Z_{Zn}(x)]^{KN}$	1,814	0,317	0,753
	Toneladas de Zn [1]	469.968	142.859	612.827
	$[Y_{Zn}(x)]^{KN}$	2,264	1,895	2,001
	$[Y_{Zn}(x)]^{KN} \cdot [P(x)]^{KN}$	1,847	0,328	0,769
	% desvio	1,755	3,618	2,320
	Toneladas de Zn (tons)[2]	478.361	148.222	626.583
Prata (Ag)	$[Z_{Ag}(x)]^{KN}$	44,949	19,323	26,762
	Toneladas de Ag [1]	1.164	657	2.035
	$[Y_{Ag}(x)]^{KN}$	62,741	99,194	88,617
	$[Y_{Ag}(x)]^{KN} \cdot [P(x)]^{KN}$	43,728	14,573	22,660
	% desvio	-2,792	-32,591	-18,105
	Toneladas de Ag (tons)[2]	1.133	2.356	3.490

Os resultados obtidos mostram que:

- i) A densidade é uma variável muito regular tendo sido obtidos valores médios de 4,4 para região R_M e 3,1 para a região R_F , a que corresponde a média global de 3,5. Em termos comparativos de tonelagem de minério, observa-se que a região R_M representa cerca de 36,5% do total, ou seja, os minérios fissurais têm maiores volumes e tonelagens.
- ii) A proporção de sulfuretos $P(x)$ na região R_M possui valor médio de 0,756 enquanto na região R_F o valor médio de $P(x)$ é 0,184. Se a delimitação / digitalização do depósito estivesse perfeita, os valores da proporção de sulfuretos nos minérios maciços deveria ser mais próxima de um, todavia, a digitalização foi condicionada pelas classificações preliminares do tipo de minério nas sondagens e pela adoção de uma estratégia otimista na digitalização.
- iii) Os teores em cobre nos minérios fissurais são em média da ordem de metade da dos minérios maciços, mas quando são considerados os teores relativos (teores na fração de sulfuretos) os minérios fissurais exibem teores relativos de cobre da ordem do dobro da dos minérios maciços. Confirma-se que os sulfuretos dos minérios fissurais são muito mais ricos do que os sulfuretos dos minérios maciços.
- iv) Quanto aos teores em zinco, os teores relativos são sempre mais elevados do que os teores normais em especial para os minérios fissurais que chegam a ser 6x. Confirma-se que os sulfuretos dos minérios maciços são mais ricos em zinco do que os sulfuretos dos minérios fissurais embora a diferença não seja tão grande como a observada no cobre.
- v) Comparando as quantidades de metal de cobre e zinco obtidas por KN das duas formas, (I) tendo como informação de partida os teores em metal ou (II) tendo como informação de partida os valores de $P(x)$ mais os teores relativos $Y_i(x)$, verifica-se que as diferenças nas quantidades de metal obtidas são de -0,37% para o cobre e 2,32% para o zinco. É relevante denotar que estes desvios demonstram a qualidade das duas estimações efetuadas e que a utilização de teores relativos não conduz a resultados divergentes. Assinala-se que a divergência para o zinco é superior à observada no cobre, o que significa que o zinco é uma variável espacialmente mais irregular.
- vi) Apesar do volume da região R_F ser muito maior do que a região R_M as quantidades de metal cobre são semelhantes, porém, para o zinco as quantidades nos minérios maciços é mais do que o dobro. Este facto demonstra a importância do minério fissural em termos do cobre, onde estão localizados teores relativos do metal $Y_{Cu}(x)$ elevados quando comparados com os do minério maciço. Em síntese, o minério maciço (região R_M) tem um grande contributo em termos dos recursos globais de zinco e, considerando os recursos de cobre, o contributo das regiões R_M e R_F são equiparáveis.
- vii) A situação da prata é distinta do cobre e do zinco, sendo muito influenciada pela amostragem espacialmente enviesada, muito mais abundante nos minérios maciços. No minério fissural ocorrem alguns valores anómalos espacialmente isolados que inflacionam em muito os quantitativos da prata. Desta forma, os quantitativos da prata nos minérios fissurais são pouco fiáveis e também são os que apresentam maiores divergências (mais de 30%) quando se utilizam os teores relativos.

4.6 MODELO MORFOLÓGICO DA VARIÁVEL PROPORÇÃO DE SULFURETOS (MODELO DE ALTA RESOLUÇÃO)

A construção do modelo morfológico de alta resolução consiste na modelação por simulação estocástica da variável $P(x)$ no depósito do Zambujal. Compreende duas etapas, simulação da variável $P(x)$ na localização das sondagens (porque foram geradas em cada localização 10 valores de $P(x)$), lei de distribuição e simulação no volume do depósito.

4.6.1 SIMULAÇÃO DOS VALORES DE $P(x)$ NA LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS

Para a simulação da variável $P(x)$ na localização das sondagens utilizou-se o algoritmo de Simulação por Campos de Probabilidade, da forma como já foi explicado no capítulo referente à metodologia. Para o efeito tomaram-se as leis de distribuição de $P(x)$ obtidas na localização das amostras das sondagens e associaram-se estas leis de distribuição ao bloco que as contém. Seguidamente geraram-se 30 realizações desta variável na localização das sondagens. A Simulação por Campos de Probabilidade implicou a geração de 30 cenários de valores de probabilidade com lei uniforme no intervalo [0; 1] com o modelo de variograma da variável $P(x)$ (ver figura 4.13 página 42). Na figura 4.21 mostra-se o resultado de uma realização obtida.

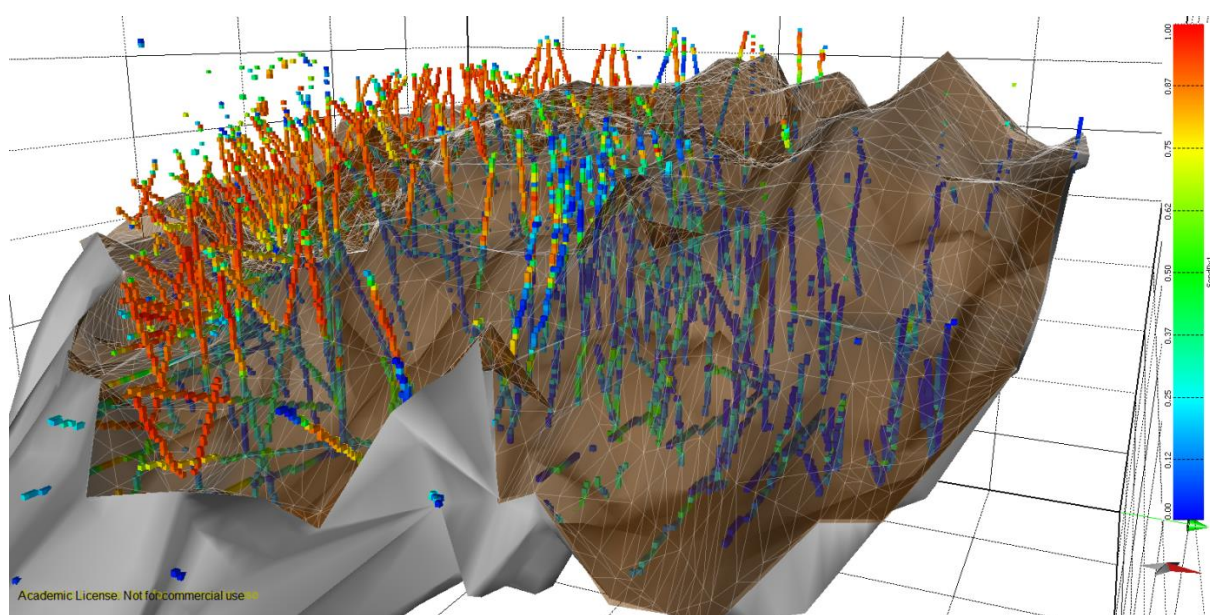


Figura 4.21 Representação 3D de uma realização de $P(x)$ na localização das sondagens, convertida para a malha de blocos. Cores quentes indicam valores de $P(x)$ elevados – minérios maciços – e cores frias indicam valores de $P(x)$ mais baixos – minérios fissurais. A superfície representa a base do minério fissural.

Os valores simulados de $P(x)$ estão compreendidos no intervalo 0 a 1. Os valores mais elevados localizam-se no topo da massa mineralizada (região R_M), ao invés dos valores mais baixos que se encontram localizados na parte inferior do depósito (região R_F). Importa referir que os teores relativos a utilizar na simulação destes teores são calculados com os resultados destas 30 realizações de $P(x)$,

ou seja, cada simulação de $P(x)$ na localização das sondagens terá um valor correspondente para os teores relativos de cobre, zinco e prata.

4.6.2 SIMULAÇÃO DOS VALORES DE $P(x)$ PARA O DEPÓSITO DO ZAMBUJAL

Tendo por base os valores simulados de $P(x)$ na localização das sondagens, fez-se a DSS desta variável para o depósito do Zambujal. Para incorporar o efeito de desagrupamento dos dados, as simulações foram condicionais a dois histogramas globais da variável $P(x)$, respetivamente para a região R_M e R_F , estimados por KI. Cada uma das 30 simulações obtidas na localização das sondagens gerou uma simulação de $P(x)$ para o depósito. Na figura 4.22 mostra-se uma representação 2D em secção de uma realização de $P(x)$ e na figura 4.23 mostra-se a representação 3D da média das 30 simulações. Na tabela 4.7 comparam-se as médias de $P(x)$ obtidas por KN com o valor médio das 30 realizações.

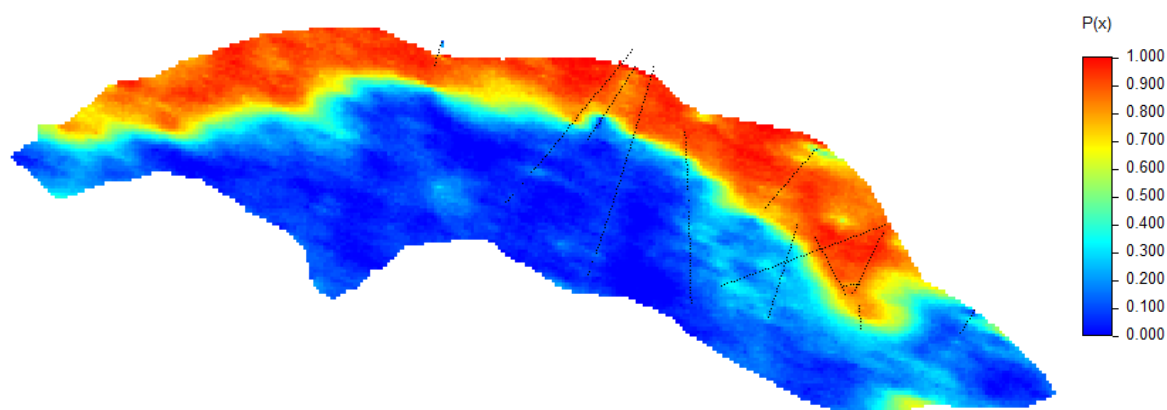


Figura 4.22 Representação dos valores de uma realização de $P(x)$ numa secção vertical (2D).

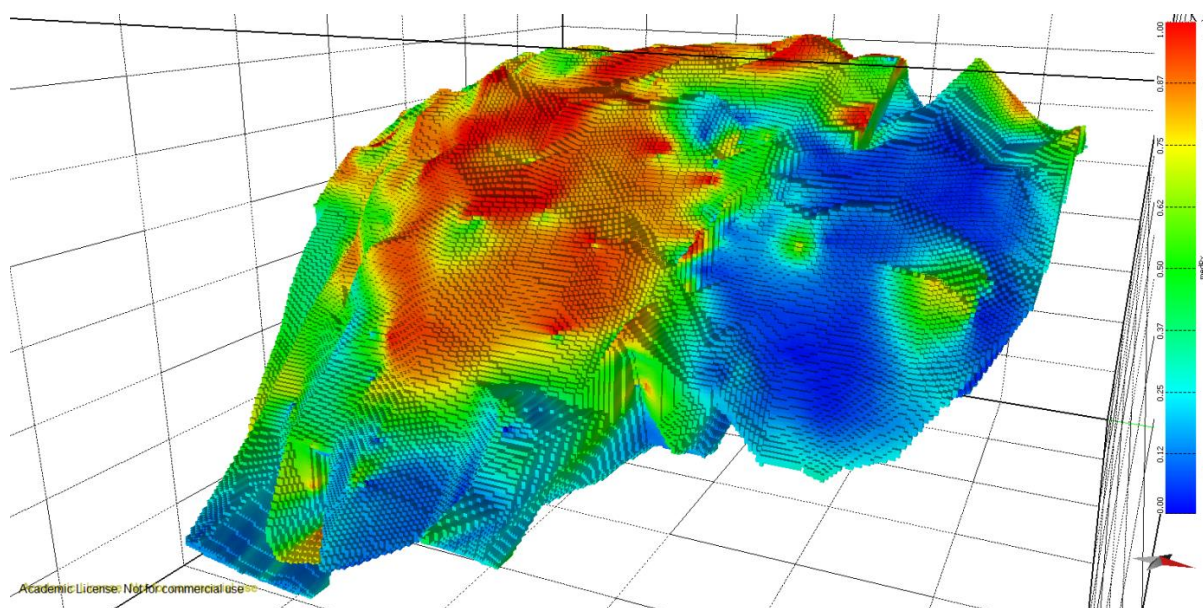


Figura 4.23 Representação 3D da média das 30 realizações da variável $P(x)$ obtidas por SSD.

Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da variável $P(x)$ obtidos por KN com os obtidos por SSD nas regiões R_M e R_F .

		R_M	R_F	$R_M + R_F$
Modelo morfológico de alta resolução [variável $P(x)$]	KN	0,755	0,184	0,350
	SSD (média)	0,768	0,176	0,348
	% desvio	1,600	-4,720	-0,720

Tanto a representação 3D (figura 4.23) como a secção vertical (figura 4.22) mostram a existência de duas regiões com valores distintos, uma no topo do depósito com valores de $P(x)$ muito elevados e outra subjacente com valores de $P(x)$ mais baixos. As figuras anteriores, mais concretamente a secção vertical (figura 4.22), mostram que a transição entre as regiões de minério maciço e fissural é muito rápida, o que está de acordo com o conhecimento extraído das sondagens e que está representado num exemplo na figura 4.11, página 40. Os valores da tabela 4.7 mostram que a média dos valores estimados por KN são muito aproximados dos equivalentes obtidos por SSD, confirmando-se que a SSD condicionada pelos histogramas globais por região estimados por KI gera realizações não enviesadas.

As simulações têm por objetivo quantificar a incerteza local, por isso determinou-se a variância local das 30 realizações. Na figura 4.24 mostra-se a título de exemplo os 10% de blocos onde a incerteza da variável $P(x)$ é menor.

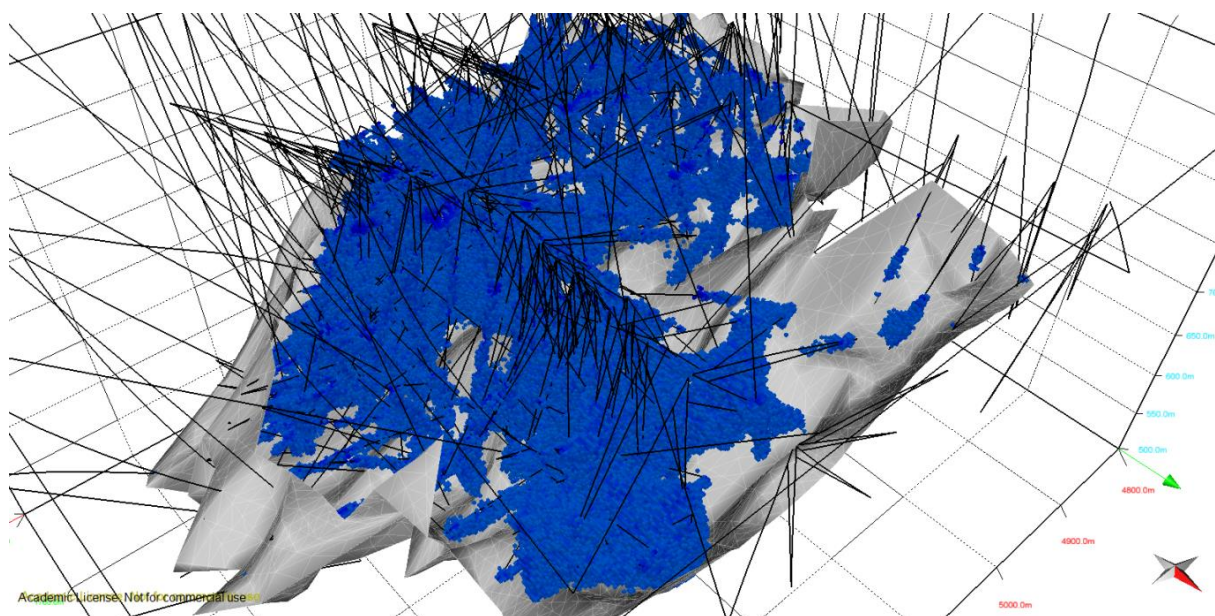


Figura 4.24 Representação 3D do modelo de incerteza de $P(x)$ associado às 30 realizações. Visualização dos 10% de blocos com menor incerteza na avaliação de $P(x)$.

4.7 MODELO DE TEORES RELATIVOS

O modelo de teores relativos tem por objetivo mapear os teores em metal na fração de sulfuretos por SSD. Nesta fase utilizou-se como informação condicionante os valores dos teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$ calculados dividindo os valores experimentais dos teores (recalculados para o suporte de 2m) por cada um dos 30 valores simulados da proporção de sulfuretos $P(x)$. Em síntese, a informação condicionante consiste em 30 cenários de teores relativos na localização das sondagens onde cada um foi construído com uma realização de $P(x)$ na localização das sondagens. Para cada um destes 30 cenários de $P(x)$ foram simulados 3 cenários de teores, ou seja, esta etapa gerou 90 cenários para cada metal. Tal como indicado para a simulação da variável $P(x)$, também para a simulação dos teores relativos foram calculados por KI os histogramas de cada teor relativo por região R_M ou R_F , que ficam desagregados e são utilizados como histograma condicionante da SSD.

Na tabela 4.8 comparam-se as médias dos teores obtidos pela estimação por KN e pela SSD, por região, R_M ou R_F . Tal como na simulação da variável $P(x)$, os resultados confirmam que a média dos teores relativos condicionada aos histogramas locais gera realizações não enviesadas relativamente aos resultados equivalentes de uma KN. Os valores correspondentes à SSD resultam da média das 90 simulações.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados dos teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$ obtidos por KN com aqueles obtidos por SSD, nas regiões R_M e R_F .

		R_M	R_F	$R_M + R_F$
Cobre (Cu)	$[Y_{Cu}(x)]^{KN}$	1,465	3,289	2,763
	$[Y_{Cu}(x)]^{SSD}$	1,482	3,339	2,795
	% desvio	1,1	1,5	1,1
Zinco (Zn)	$[Y_{Zn}(x)]^{KN}$	2,264	1,895	2,001
	$[Y_{Zn}(x)]^{SSD}$	2,216	1,965	2,031
	% desvio	-2,2	3,6	1,5
Prata (Ag)	$[Y_{Ag}(x)]^{KN}$	62,741	99,194	88,617
	$[Y_{Ag}(x)]^{SSD}$	61,777	99,877	88,812
	% desvio	-1,6	0,7	0,2

Com as 90 imagens simuladas de cada metal, calcularam-se a imagem média e a imagem da variância local. Para confirmar definitivamente a coerência dos resultados obtidos, multiplicaram-se as imagens simuladas dos teores relativos pelas imagens simuladas homólogas de $P(x)$ (reconstrução de imagens dos teores normais), e calculou-se a média destas imagens dos teores normais. Na figura 4.25 mostra-se uma representação 3D dos teores relativos em cobre e na figura 4.26 uma representação 3D dos teores médios em cobre.

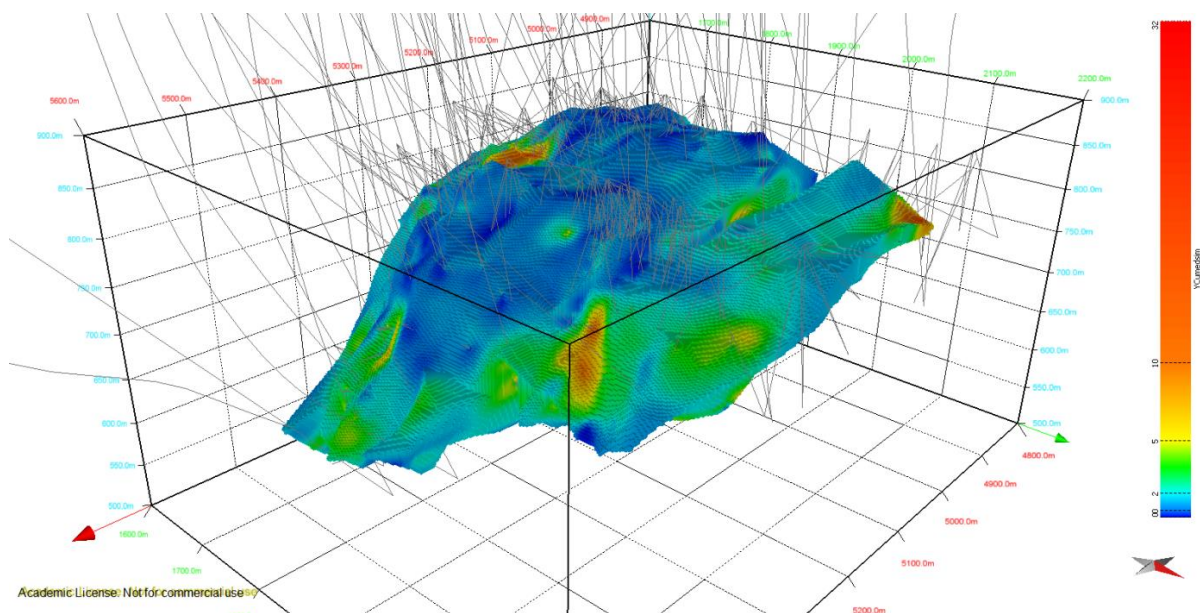


Figura 4.25 Representação 3D da média das 90 simulações do teor relativo de cobre $Y_{Cu}(x)$.

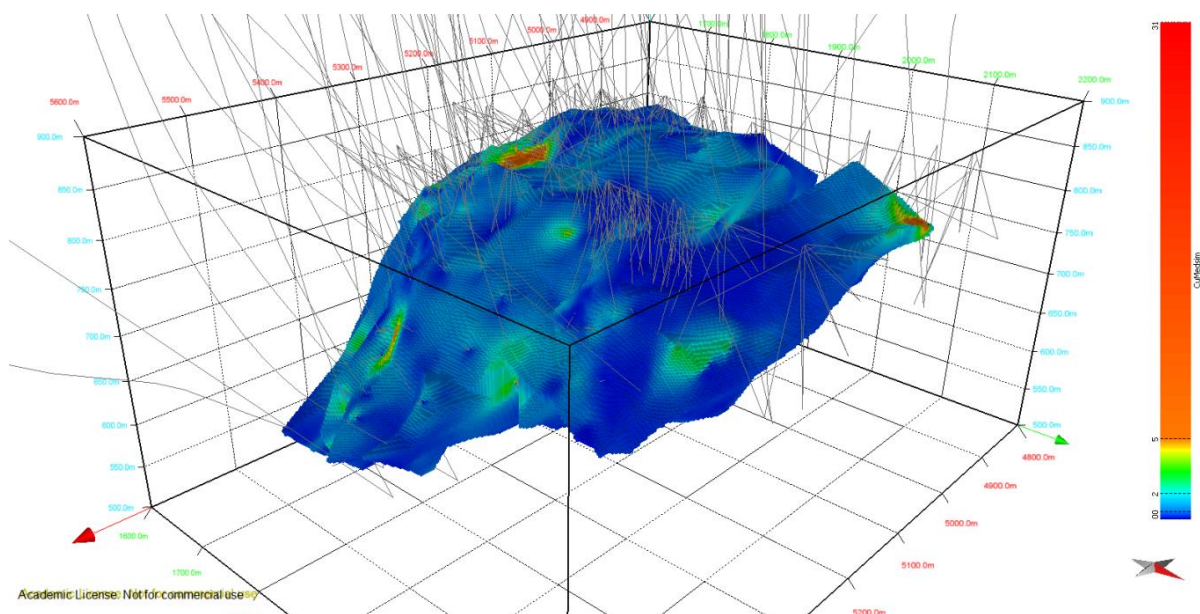


Figura 4.26 Representação 3D da média das 90 simulações do teor de cobre $Z_{Cu}(x)$.

As representações a 3D mostram que os teores de cobre $Z_{Cu}(x)$ são mais homogêneos em todo o depósito e não se distinguem as zonas de minérios maciços e fissurais, já no que respeita aos teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$ verifica-se a presença valores mais elevados no minério fissural e mais baixos no minério maciço. A transição entre os teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$, mais elevados nos minérios fissurais para os mais baixos no minério maciço, é brusca.

Vale a pena enfatizar que os modelos de previsão têm incerteza associada e, que no caso das simulações de teores, a variância local dos resultados é um bom indicador da incerteza transportada pela distribuição espacial das observações, heterogeneidade das observações e modelo de variograma utilizado.

A avaliação da incerteza melhora com o número de realizações, sendo que, neste caso existem 90 realizações. Na figura 4.27 representa-se a incerteza local da avaliação dos teores em cobre associada a $Y_{Cu}(x)$, onde para facilitar a visualização apenas se representam os 30% de blocos com menor incerteza.

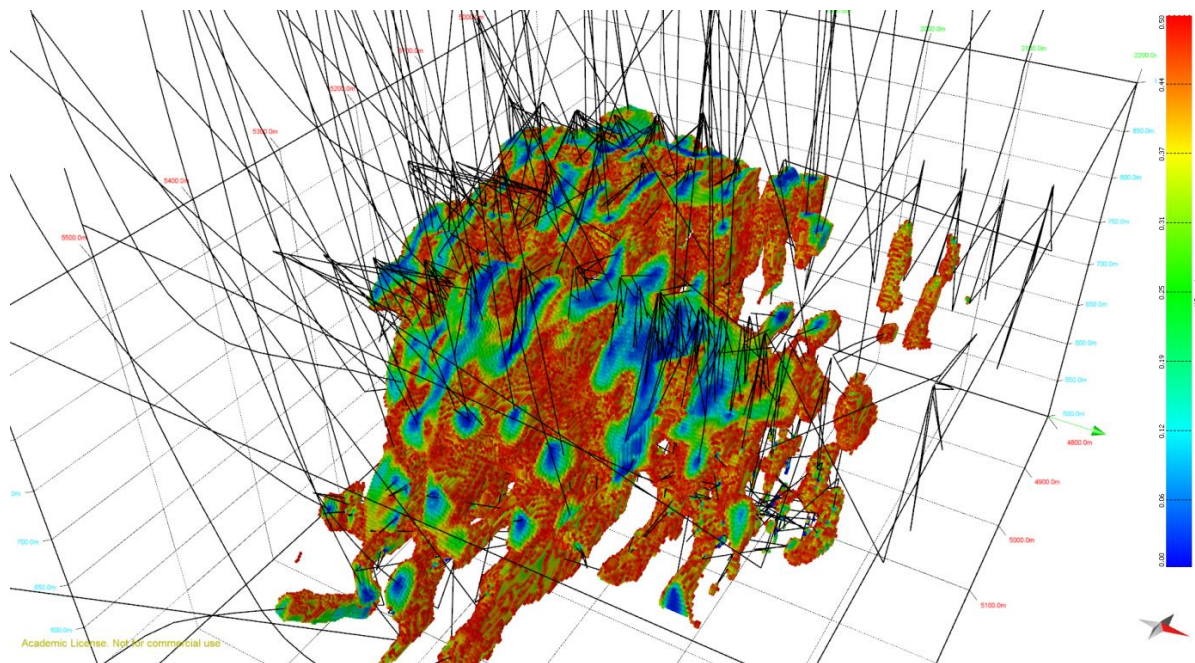


Figura 4.27 Representação 3D da incerteza local de $Y_{Cu}(x)$ calculada pela variância local, estão representados os 30% de blocos com menor variância, ou seja, menor incerteza.

Tal como na representação da incerteza da variável $P(x)$, verifica-se que os blocos com menor incerteza estão próximos das sondagens, e que as zonas mais compactas de blocos são as que estão amostradas por uma rede mais densa de sondagens. Na representação, as áreas a azul, na zona dos leques de sondagens, indicam locais de menor incerteza, aumentando a incerteza nos locais mais distanciados das sondagens (cores verde a vermelho).

Os modelos de simulação estocástica geram vários resultados localmente, que constituem por bloco uma função de distribuição condicional. Estas leis locais podem ser utilizadas na quantificação dos recursos atribuindo-lhes graus de probabilidade que podem ser usados para gerir a valorização do depósito mineral. Desta forma, a incerteza pode ser sempre utilizada para classificar os quantitativos de minério e metal por classes de incerteza, nomeadamente em inferidos, indicados e medidos.

4.8 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa comparam-se as imagens obtidas na simulação dos teores e da proporção de sulfuretos $P(x)$, quer em termos de algumas realizações individuais, valores médios e variâncias sempre na mesma secção vertical (orientação E-W, secção 102). Na figura 4.28 representa-se o modelo morfológico de baixa resolução binário, o modelo médio da variável $P(x)$, e o modelo médio dos teores

$Z_{Cu}(x)$, $Z_{Zn}(x)$ e $Z_{Ag}(x)$; na figura 4.29 representa-se o modelo morfológico de baixa resolução binário, o modelo médio da variável $P(x)$, e o modelo médio dos teores relativos de $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$; finalmente na figura 4.30 representa-se o modelo morfológico de baixa resolução binário, o modelo de incerteza da variável $P(x)$, e os modelos de incerteza dos teores relativos de $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$.

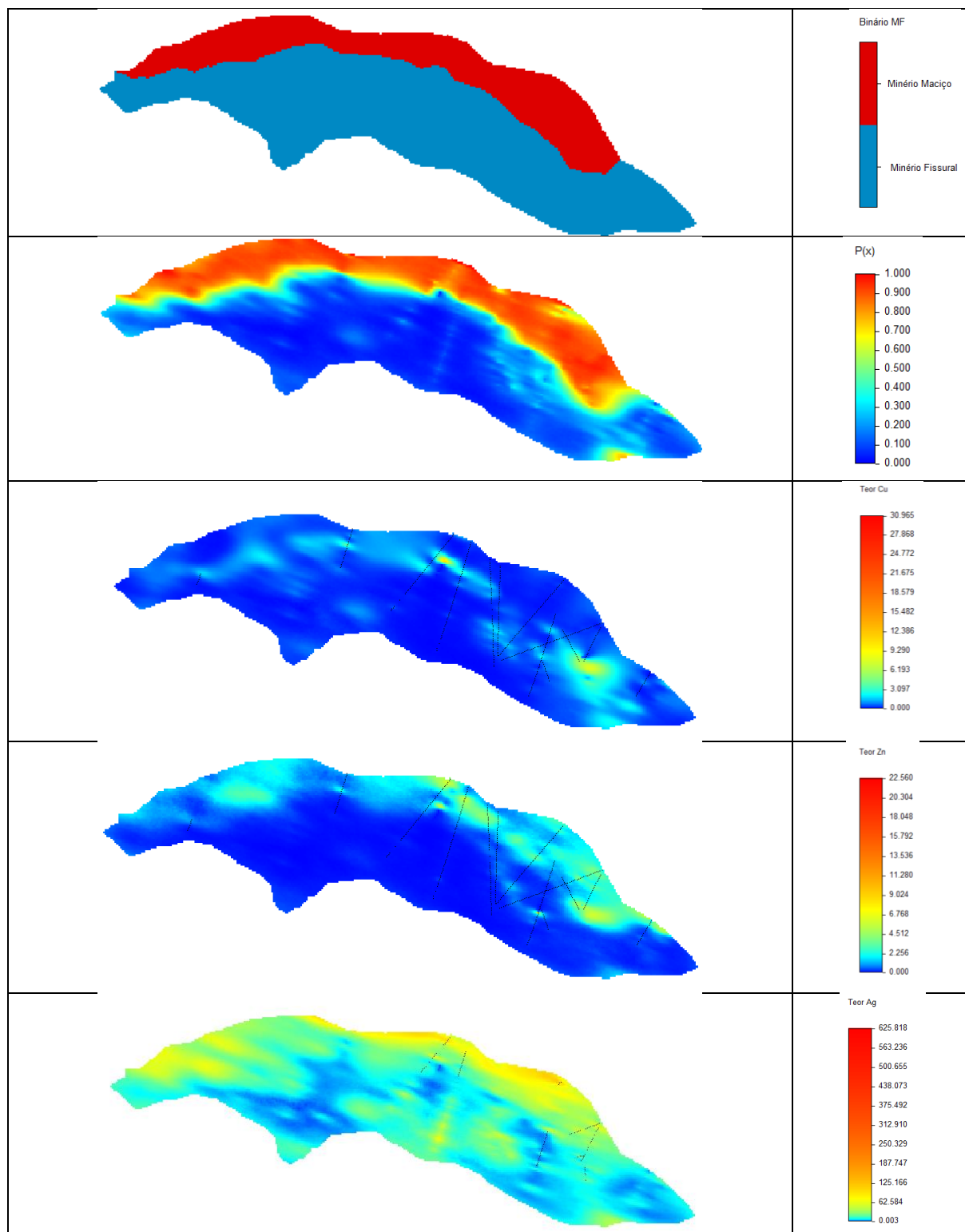


Figura 4.28 Representação em secção do modelo morfológico binário, média das simulações de $P(x)$ e média das simulações dos teores de cobre $Z_{Cu}(x)$, zinco $Z_{Zn}(x)$ e prata $Z_{Ag}(x)$.

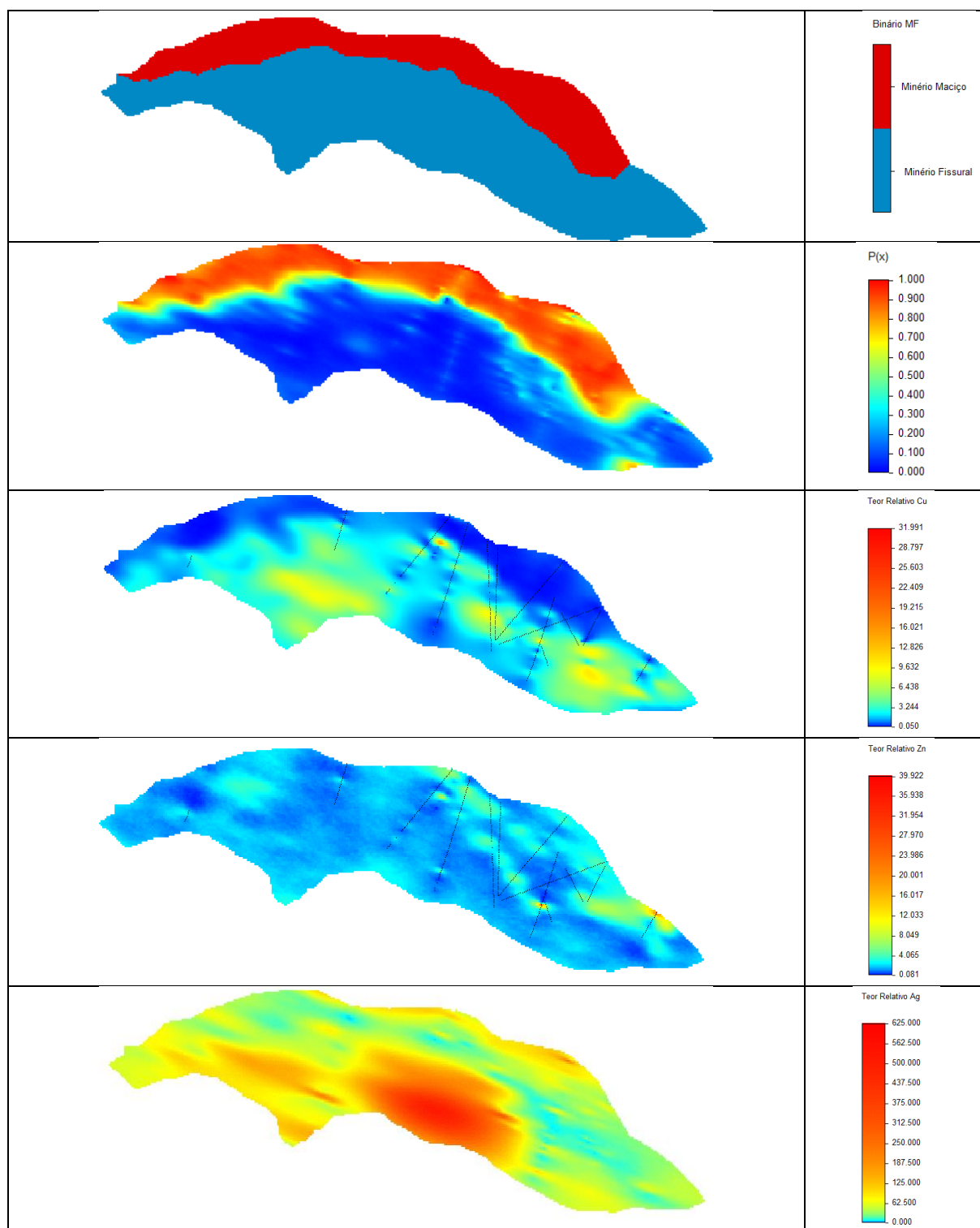


Figura 4.29 Representação em secção do modelo morfológico binário, média das simulações de $P(x)$ e média das simulações dos teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$, zinco $Y_{Zn}(x)$ e prata $Y_{Ag}(x)$.

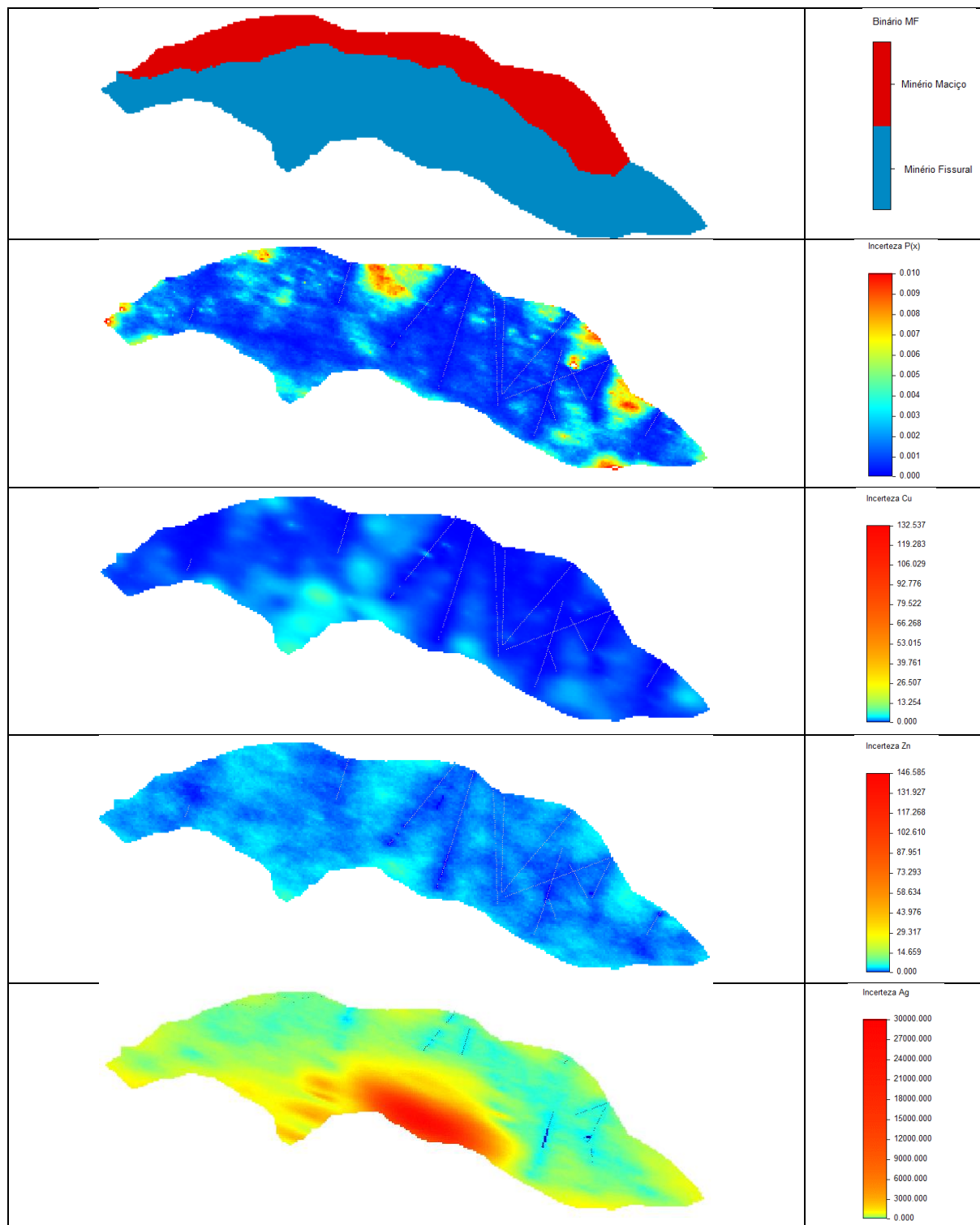


Figura 4.30 Representação em secção do modelo morfológico binário, variância local das simulações de $P(x)$ e variância local das simulações dos teores relativos de cobre $Y_{Cu}(x)$, zinco $Y_{Zn}(x)$ e prata $Y_{Ag}(x)$.

Na figura 4.28 observa-se em secção vertical os resultados da média das 90 realizações efetuadas por SSD para os teores $Z_{Cu}(x)$, $Z_{Zn}(x)$ e $Z_{Ag}(x)$. No caso do cobre, os teores encontram-se distribuídos de modo homogéneo em ambas as regiões R_M e R_F , com presença pontual de teores elevados. O caso do zinco mostra ser distinto, no qual se verifica a ocorrência dos teores mais elevados do elemento preferencialmente na região de minério maciço R_M . O comportamento da prata é semelhante ao do zinco, todavia, para esta variável deve ser salvaguardado o facto de que a amostragem conta com muito menos amostras na região R_F .

Na figura 4.29, representam-se as imagens da média das 90 realizações efetuadas por SSD para os teores relativos $Y_{Cu}(x)$, $Y_{Zn}(x)$ e $Y_{Ag}(x)$. No caso do cobre é notória a mais elevada concentração e persistência de teores altos na região de minérios fissurais R_F . No mapa dos teores relativos de zinco pode dizer-se que a contribuição dos teores elevados provém tanto do minério maciço como do minério fissural. No caso da prata os teores são igualmente distribuídos pelas duas regiões, contudo, deve-se ter em atenção a subamostragem desta variável comparativamente às restantes e o mais que provável enviesamento para amostragem de valores mais elevados.

A terminar esta análise, na figura 4.30 compara-se a incerteza local do modelo morfológico de alta resolução e a do modelo de teores tendo por base a variância dos valores simulados. A visualização em secções com esta orientação preferencialmente paralela às sondagens em leque permite avaliar a variação da incerteza em relação à presença ou ausência de observações. Como seria expectável, verifica-se baixa incerteza (variância) em locais próximo de sondagens, e a incerteza sobe gradualmente à medida que nos afastamos das sondagens. A incerteza de $P(x)$ é irregular, tem valores pontualmente mais altos próximos do topo da formação de minério maciço; na base, a incerteza na transição maciço fissural é baixa. Embora as escalas de incerteza sejam diferentes, é possível afirmar que a incerteza é mais baixa para o cobre e zinco e é muito mais elevada para a prata. O cobre e o zinco têm exatamente o mesmo número de amostras e os modelos de variograma são idênticos, por isso comportamento da incerteza é semelhante. A prata é a variável com a maior incerteza, e deve-se exclusivamente a subamostragem desta variável comparativamente com as outras duas.

4.9 CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RECURSOS

Na última secção deste trabalho são quantificadas as tonelagens de cobre do depósito do Zambujal em função do teor em cobre e discute-se a questão de introduzir um teor de corte morfológico baseado na variável $P(x)$.

Na figura 4.31 apresentam-se três curvas teor-tonelagem obtidas a partir das 90 simulações dos teores relativos de cobre e das 30 das proporções de sulfuretos, para teores de corte em cobre variando entre 0% e 10%, com incrementos de 0,1%. Para cada teor de corte obteve-se a média dos quantitativos em cobre dos 90 valores simulados (curva cenário médio a azul), o valor mínimo (curva cenário pessimista a cor vermelha) e o valor máximo (curva cenário otimista a cor verde). Considerando um hipotético teor de corte igual a zero, a reserva média de cobre calculada pelas simulações é praticamente coincidente com o recurso calculado por KN, cerca de 520.000 toneladas. Se considerarmos o teor de corte utilizado

na mina de 1,6% para o cobre, o recurso em metal rondará as 270.000 toneladas. É interessante verificar que um teor de corte de 1,6% para o cobre faz com que metade do recurso não seja explorado por serem minérios pobres.

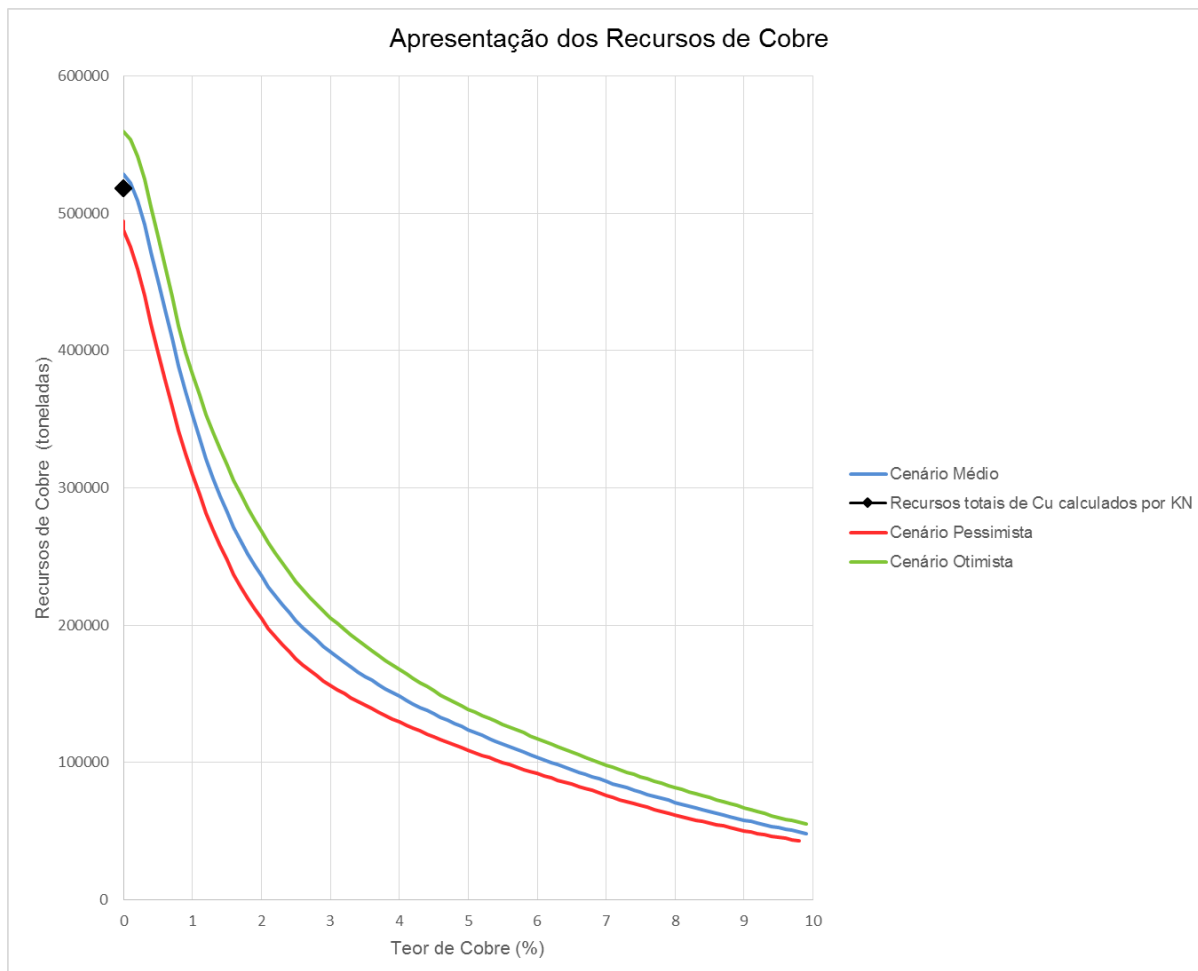


Figura 4.31 Apresentação das curvas de recursos do cobre em função do teor de cobre. Comparação dos cenários otimista, médio e pessimista resultante do máximo, média a mínimo de todas as curvas e indicação do recurso total de cobre calculado por KN.

Apresentam-se seguidamente as curvas relativas à variação do volume de minério e volume de rocha encaixante para diferentes teores de corte do cobre (figura 4.32). Neste caso tem-se em conta a variação do volume tanto na região onde a presença de rocha encaixante é notória (região R_F) bem como na região onde os sulfuretos maciços predominam (região R_M). Comparando os volumes totais das duas regiões mineralizadas, para valores de corte de 0% ou ligeiramente superiores o volume de rocha encaixante que é extraído é muito significativo, da ordem do dobro dos minerais de sulfuretos. Contudo, à medida que o teor de corte aumenta, essa diferença vai diminuindo até se inverterm os resultados para um teor de corte a rondar os 0,7%. Este gráfico mostra que o volume de rocha encaixante é muito sensível com o teor de corte e aumenta exponencialmente para valores de corte inferiores a 1%.

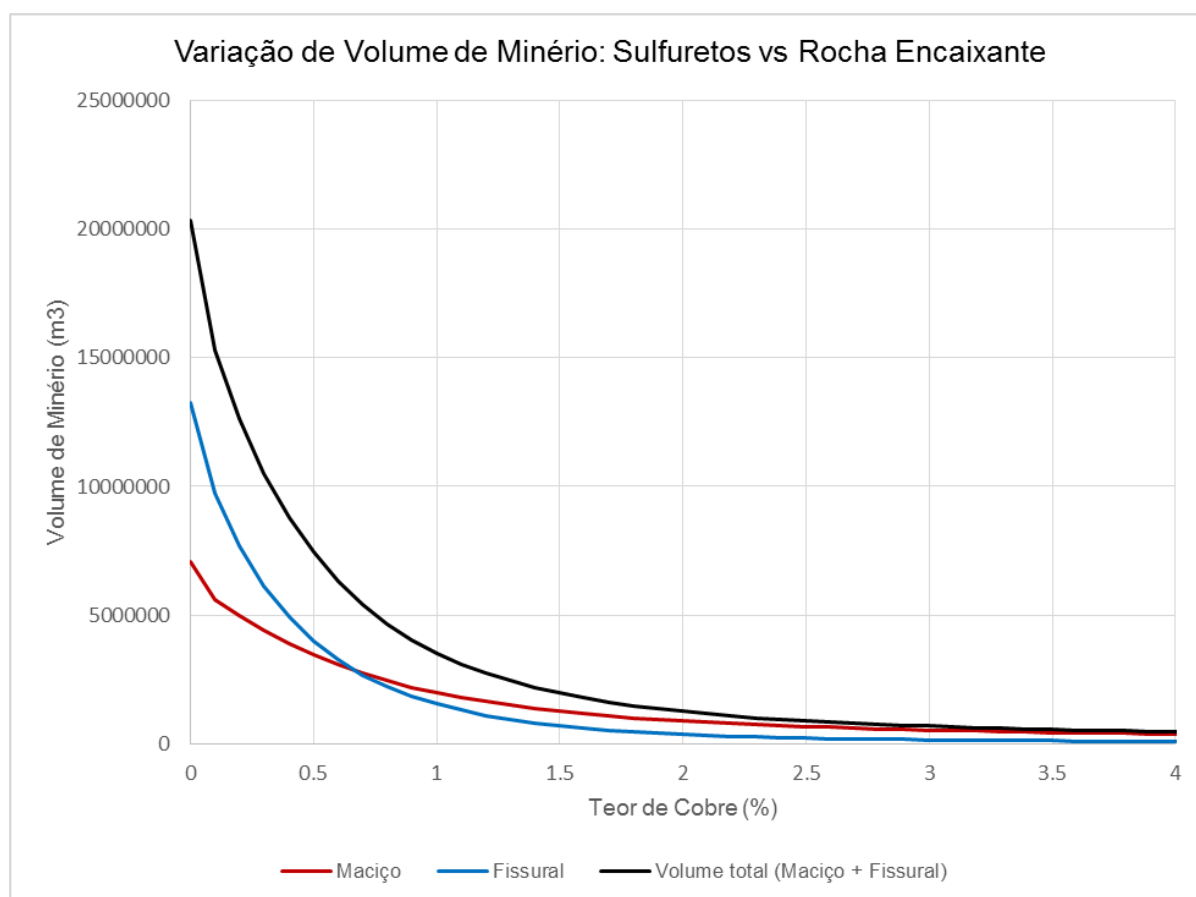


Figura 4.32 Variação do volume total de minério (sulfuretos) e dos volumes desagregados em maciço e fissural em função do teor de cobre.

Habitualmente a quantificação dos recursos numa mina utiliza o teor de corte do metal principal como a única referência e algumas vezes também a REM ou razão estéril-minério principalmente em céus-abertos. No depósito do Zambujal, e como foi avaliado o parâmetro morfológico variável proporção de sulfuretos $P(x)$, decidiu-se testar a possibilidade de introdução desta variável como um segundo parâmetro de corte, ou seja, avaliar os recursos combinando o teor em metal e a morfologia local do depósito. Uma das motivações para esta análise é o facto de ser possível considerar um teor de corte em metal um pouco mais baixo no caso de minérios com uma significativa quantidade de rocha encaixante, ou seja, um teor de corte que é também função da variável $P(x)$. Por exemplo, para duas matrizes rochosas com o mesmo teor em cobre, a recuperação do cobre na lavaria é superior na matriz que incluía mais rocha encaixante. Assim construiu-se o gráfico bidimensional representado na figura 4.33 que relaciona, simultaneamente, os recursos em cobre com o teor de cobre e a proporção de sulfuretos $P(x)$. O espectro de cores representa a quantidade de recursos de cobre, indicando-se um decréscimo dos recursos de metal das cores quentes para as cores frias. Este gráfico foi feito para os valores médios das 90 simulações. O valor máximo de 528 000 toneladas corresponde a um teor de corte igual a 0% em cobre e para qualquer valor de $P(x)$ e é igual ao representado no gráfico da figura 4.31.

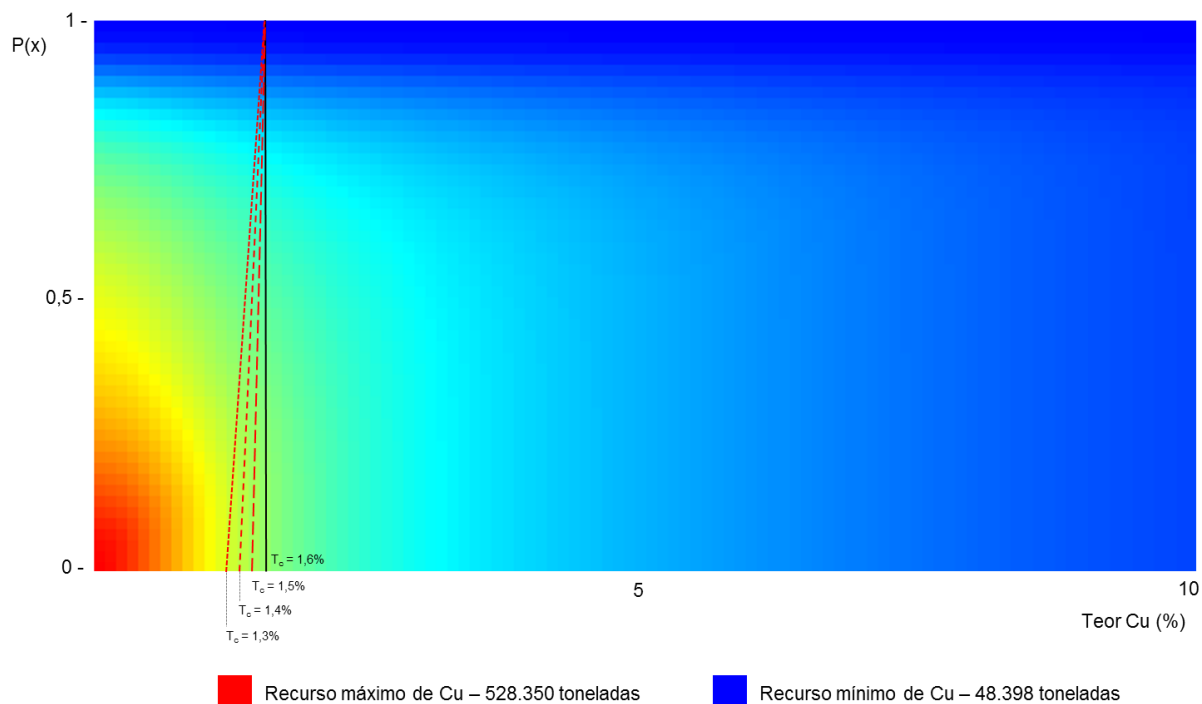


Figura 4.33 Quantidades de minério de cobre em função da variação do teor de corte e da proporção de sulfuretos $P(x)$. A quantidade de recurso aumenta das cores frias para as cores quentes.

Fez-se então um exercício de análise de sensibilidade, de reduções sucessivas do teor de corte que passam a ser funções lineares em relação à variável $P(x)$ conforme estão representadas no gráfico da figura 4.33. Por exemplo, na reta mais à esquerda o teor de corte em cobre é 1,6% se a variável $P(x)$ for igual a 1 (arquetipo de minérios maciços) mas baixa gradual e linearmente para 1,3% quando a variável $P(x)$ atinge um valor de corte hipotético de zero (arquetipo de minérios 100% fissurais). Trata-se no fundo de considerar o teor de corte em cobre como uma variável dependente de $P(x)$ podendo esta dependência ser uma função de qualquer tipo, linear ou não linear.

Contabilizaram-se então os recursos para todas as variações indicadas (+0,1%, +0,2%, +0,3% e -0,1%, -0,2%, -0,3%) e sintetizam-se estes resultados na tabela 4.9 e no gráfico da figura 4.34. Por exemplo, se considerarmos um teor de corte variável entre 1,5% para minérios fissurais e 1,6% para minérios maciços, em vez de 1,6% para todo o tipo de minério, os recursos têm um incremento de 4%, já se o teor de corte em minérios fissurais baixar para 1,4% o recurso aumenta 8%. O gráfico da figura 4.34 mostra que o incremento nos recursos é aproximadamente linear com a variação no teor de corte.

Esta análise releva a importância dos minérios fissurais que, embora tenham teores globais mais baixos, poder-se-á considerar a adoção de teores de corte menos restritivos aumentando a quantidade do recurso e o bom aproveitamento do jazigo, que constitui sempre um recurso limitado.

Tabela 4.9 – Tabela síntese das variações nos recursos de cobre aquando da alteração do teor de corte em +0,1%, +0,2%, +0,3% e -0,1%, -0,2%, -0,3%.

Teor de corte (%)	Recursos de cobre nos cenários (toneladas)			Variação do teor de corte (%)	Variação dos recursos de cobre nos cenários (%)		
	Médio	Pessimista	Otimista		Médio	Pessimista	Otimista
1,3	307.021	281.422	340.282	-18,75	13,15	13,95	11,33
1,4	294.142	268.955	327.909	-12,50	8,40	8,90	7,28
1,5	282.283	257.529	316.455	-6,25	4,03	4,28	3,53
1,6	271.341	246.964	305.659	0	0	0	0
1,7	261.251	237.143	295.552	6,25	-3,72	-3,98	-3,31
1,8	251.933	227.978	285.708	12,50	-7,15	-7,69	-6,53
1,9	243.333	219.680	276.669	18,75	-10,32	-11,05	-9,48

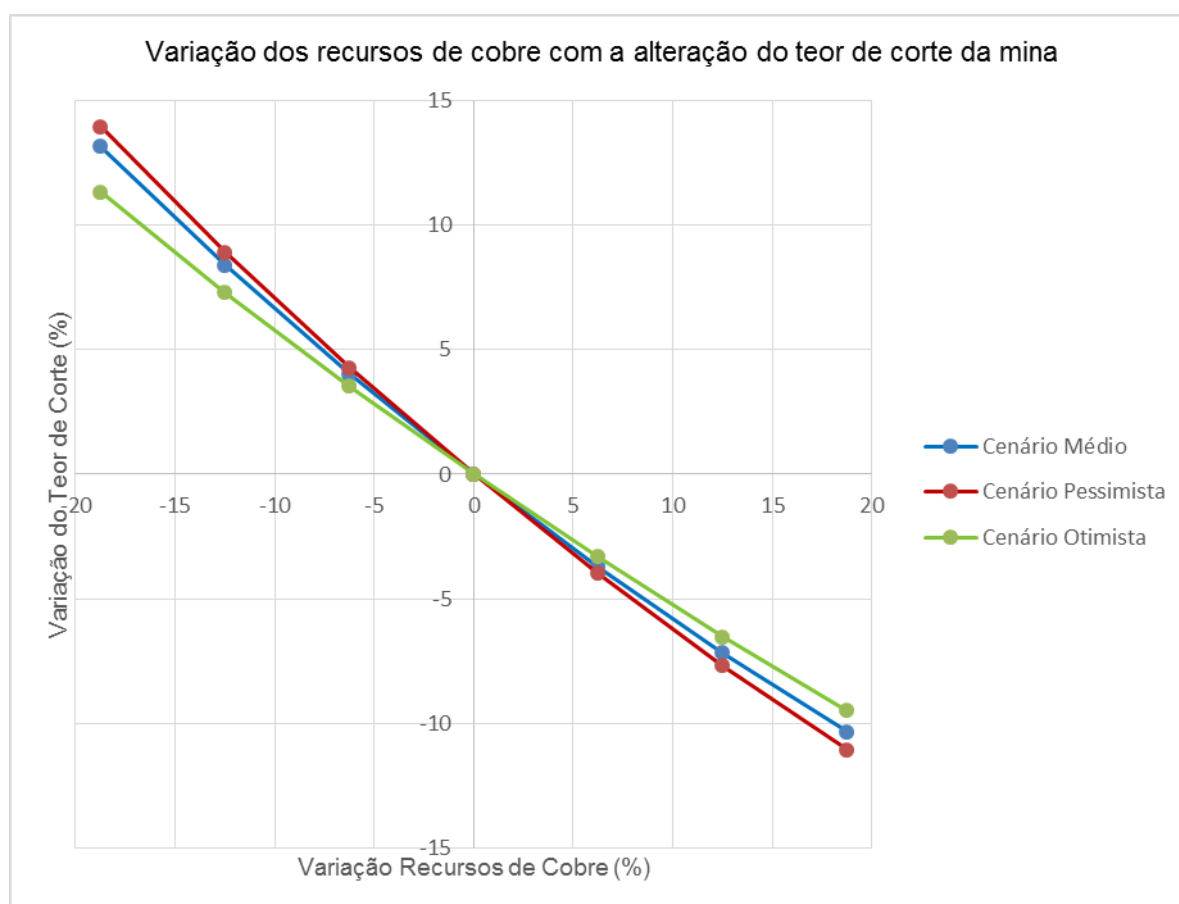


Figura 4.34 Variação dos recursos de cobre com a alteração do teor de corte da mina conforme as retas representadas no gráfico da figura 4.33. Representação dos quantitativos para o cenário otimista, médio e pessimista.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação tem como principal objetivo a construção de um modelo tridimensional da morfologia e dos teores de um dos depósitos da mina de Neves-Corvo, o depósito do Zambujal. Trata-se de um depósito vulcanogénico que apresenta sulfuretos maciços no topo e minério fissural na zona subjacente. Estes depósitos caracterizam-se pela sua formação em zonas próximas dos fundos marinhos.

Na construção de um modelo de teores em depósitos vulcanogénicos, onde ocorrem minérios maciços e fissurais, é importante ter-se em consideração:

1. A proporção local entre os sulfuretos e a rocha encaixante $P(x)$ na matriz, que constitui uma variável morfológica e, como tal, deve ser modelada *a priori*. Assim, neste trabalho avaliaram-se os valores para a proporção de sulfuretos e de rocha encaixante, a variável $P(x)$, em todas as amostras das sondagens, combinando valores da densidade $D(x)$, os teores de alguns elementos químicos $Z_j(x)$ e os principais minerais da paragénese do depósito. As soluções obtidas para a variável $P(x)$ não são únicas, por isso, para cada localização determinaram-se 10 soluções constituindo uma lei de distribuição local de $P(x)$. Com as leis de distribuição locais na localização das sondagens geraram-se valores da variável $P(x)$ ainda na localização das sondagens por Simulação por Campos de Probabilidade de forma a condicionar as soluções ao modelo de variograma. Cada um dos cenários simulados de $P(x)$ na localização das sondagens permitiu calcular os teores relativos e prosseguir para as etapas de modelação de teores,
2. O mapeamento dos teores na fração dos sulfuretos, os designados teores relativos. Para o efeito foram calculadas e modeladas as variáveis auxiliares de teores para cada metal $Y_j(x)$, em que os teores relativos correspondem ao quociente entre o teor em metal e a variável proporção $P(x)$. A modelação dos teores em separado na fração de sulfuretos filtra os variogramas dos metais da questão morfológica e permite estimar para cada bloco seleção a proporção de minérios e a diluição interna / razão estéril minério (REM).

Na primeira fase do trabalho foi realizada uma análise estatística univariada, bivariada e multivariada dos elementos químicos com mais interesse para este estudo (Fe, Cu, Zn, Pb, Ag e S) e a densidade da rocha, o que justificou a proposta de construção da variável proporção $P(x)$ à custa das restantes variáveis e da paragénese do depósito do Zambujal. Esta análise também fundamentou a escolha do suporte de 2 metros e a dimensão de 2x2x2m para cada bloco. Na modelação de todas as variáveis, nomeadamente dos teores em metal, utilizou-se sempre a estimação por KN mais a SSD. Os valores estimados por KN permitem quantificar quantidades de minério e de metal em termos globais e por região (R_M e R_F) e estes valores de referência foram sempre comparados com os da simulação que se confirmaram ser da mesma ordem de grandeza. A utilização das variáveis auxiliares de teores relativos calculadas pelo quociente entre os teores medidos e a proporção dos sulfuretos, que representam o teor em metal na fração de rocha exclusivamente sulfureto deram os mesmos quantitativos globais do que as variáveis teores habituais pelo que a modelação proposta não gerou enviesamento.

A geração de imagens simuladas permite avaliar as zonas de maior incerteza face à informação disponível, tendo em conta a distância às amostras mais próximas, a continuidade espacial e a heterogeneidade local das observações. Pelos resultados do estudo, o depósito do Zambujal já dispõe da quantidade de informação suficiente para que os quantitativos dos recursos possam ser apresentados com confiança. Das variáveis estudadas, o cobre e o zinco apresentam o mesmo padrão de incerteza, já a incerteza da prata é muito maior. A prata tem menos determinações analíticas no depósito por isso se explica a incerteza mais elevada. A variável $P(x)$ mostrou zonas de incerteza pontuais mais elevadas, principalmente no topo do minério maciço, porque são zonas de transição.

A metodologia proposta é relevante no sentido em que a geoestatística, particularmente a estimação e simulação dos teores relativos, poderá ser utilizada na demonstração da importância do minério do tipo fissural (*stockwork*) no depósito de Neves-Corvo, tendo em conta os altos teores de cobre, zinco e prata naquela região. Regra geral, os teores de cobre são consideravelmente inferiores na região do minério fissural quando comparados com os teores no minério maciço. Contudo, quando se considera apenas a fração dos sulfuretos, os teores relativos de cobre no minério fissural são superiores aos da região de minério maciço, em média o dobro. Já relativamente ao zinco e à prata não existem grandes diferenças.

O depósito de Neves-Corvo é reconhecido mundialmente por possuir um rácio cobre-zinco extremamente elevado e fora do comum. Nas zonas mais profundas do depósito, correspondentes à região do minério fissural, é importante denotar mineralizações extremamente ricas em cobre, que refletem processos geoquímicos de enriquecimento tardio e enriquecimento/refinamento local devido a fenómenos de remobilização de fluídos hidrotermais mineralizantes.

Importa também fazer referência aos processos de flutuação do minério de cobre e zinco. A eficiência na flutuação é mais elevada quando os sulfuretos são separados da rocha encaixante, comparando com a separação de diferentes tipos de metais (por exemplo a separação da calcopirite da pirite). Assim sendo, em teoria, a recuperação do metal na lavaria do minério do tipo fissural é mais elevada o que permitiria aceitar minérios com menores teores de corte, aumentando as toneladas de metal recuperado. Acrescenta ainda que o minério fissural apresenta menos elementos penalizantes que desvalorizam o preço por tonelagem de cobre e de zinco, tais como chumbo, arsénio e bismuto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albouy L, Conde LN, Fogliierini F, Leca X, Morikis A (1981) Le gisement de sulfures massifs polymétalliques de Neves-Corvo (Baixo Alentejo, Sud Portugal). *Chronique Recherche Minière*, 460, 5–27.
- Akbar DA (2012) Reserve Estimation of Central Part of Choghart North Anomaly Iron Ore Deposit Through Ordinary Kriging Method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22: 573–577.
- Almeida JA, Soares A, Reynaud R (1993) Modelling the Shape of Several Marble Types in a Quarry. *Proceedings of the XXIV International Symposium APCOM, Montreal*, vol. 3: 452–459.
- Almeida JA, Soares A, Albuquerque A (1996) Zonal control to estimate classes of histograms: application to a diamond alluvial deposit. *IST*, 11p.
- Almeida JA (2010) Modelling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. *Engineering Geology*, 114 (1), 26–33.
- Barriga, F (1999) Metallogenesis in the Iberian pyrite belt. *Pre-Mesozoic geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin. 369-379.
- Barriga F, Fyfe W (1988) Giant Pyritic Base-metal Deposits: The Example of Feitais, Aljustrel, Portugal. *Chemical Geology*, 69(3–4): 331-343.
- Caers J (2011). *Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*. Wiley-Blackwell, West Sussex, 89p.
- Carvalho D, Ferreira A (1994) Geologia de Neves-Corvo: Estado Actual do Conhecimento. *Portugal Mineral*, 33: 1-5; 36: 7–8.
- Carvalho D, Barriga F, Munhá, J (1999) Bimodal-siliciclastic systems – the case of the Iberian pyrite belt. *Reviews on Economic Geology*, 8, 375-408.
- Charifo G, Almeida JA, Ferreira AM (2013) Managing borehole samples of unequal lengths to construct a high-resolution mining model of mineral grades zoned by geological units. *Journal of Geochemical Exploration*, 132: 209–223.
- Charifo G, Ferreira AM, Almeida JA, Prian JP (2014) Geochemical and statistical characterization of the phosphate facies of the Farim-Saliquinhé phosphate mineralization (Guinea-Bissau). *Resource Geology* 64 (1), 58–75.
- Deutsch CV, Journel AG (1998) *GSLIB. Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2ª edição, ed. Oxford University Press, Nova Iorque, 369 pp. + CD-ROM.
- Dias R, Araújo A, Terrinha P, Kullberg JC (2011) *Geologia de Portugal, Volume I – Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. Escolar Editora, Lisboa, 807p.
- Diehl P, David M (1982) Classification of Ore Reserves/Resources Based on Geostatistical Methods. *Canadian Mining Metal*, 75, 838:127-136.

- Dimitrakopoulos R (2009) Implementation of Conditional Simulation by Successive Residuals. *Computers & Geosciences* 37 (2011), Elsevier. 129-142.
- Dill HG (2008) The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews* 100, 1-420.
- Emery X, Robles LN (2009) Simulation of Mineral Grades with Hard and Soft Conditioning Data: Application to a Porphyry Copper Deposit. *Computers & Geosciences*, 13(1):79–89.
- Froidevaux R (1982) Geostatistics and ore reserve classification. *Canadian Mining Metal*, vol. 75, 843: 77–83.
- Glacken IM, Snowden DV (2001) Mineral Resource Estimation, in *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice* (Ed: A C Edwards), 189-198.
- Goovaerts P (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 483p.
- Isaaks EH, Srivastava RM (1989) *An Introduction to Applied Geostatistics*, 561p.
- Klein C, Cornelius S, Hurlbut J (1993) *Manual of Mineralogy*. (21st ed) John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Leca X, Ribeiro A, Oliveira JT, Silva JB, Albouy L, Carvalho P, Merino F (1983) Cadre géologique des minéralisations de Neves-Corvo (Baixo Alentejo, Portugal). *Lithostratigraphie, paléogéographie et tectonique*. *Memoires Bureau de Recherches Geologiques Minières*; 121.
- Leistel JM, Marcoux E, Thiéblemond D, Quesada C, Sánchez A, Almodóvar GR, Pascual E, Sáez R (1998) The volcanic-hosted massive sulphid deposits of the Iberian pyrite belt. *Mineralium Deposita*, 33, 2-3.
- Mathur R, Ruiz J, Tornos F (1999) Age and Sources of the Ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian Pyrite Belt, from Re-Os Isotopes. *Mineralium Deposita*, 34, 790–793.
- Matias FV, Almeida JA, Chichorro M (2015) A Multistep Methodology for Building a Stochastic Model of Gold Grades in the Disseminated and Complex Deposit of Casas Novas in Alentejo, Southern Portugal. *Resource Geology* 65 (4), 361–374.
- Nunes R, Almeida JA (2010) Parallelization of Sequential Gaussian, Indicator and Direct Simulation Algorithms. *Computers & Geosciences*, 36(8): 1042–1052.
- Oliveira JT (1983) The Marine Carboniferous of South Portugal. *Serviços Geológicos de Portugal*, 29: 3-38.
- Oliveira JT (1990) South Portuguese zone, Pre-mesozoic geology of Iberia. Springer-Verlag, Berlin, 333-346.
- Oliveira JT, Carvalho P, Pereira Z, Pacheco N, Fernandes JP, Korn D (1997) Stratigraphy of the Neves-Corvo Mine Region. *Neves Corvo Field Conference*, Universidade de Lisboa. 86-87.

- Oliveira JT, Horm M, Paproth E (1979) Preliminary note on the stratigraphy of the Baixo–Alentejo Flysch Group, Carboniferous of Portugal and on the palaeogeographic development compared to corresponding units in NorthWest Germany. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 65, 151-168.
- Oliveira J, Pereira Z, Pacheco N, Carvalho P (2004) Stratigraphy of the Tectonically Imbricated Lithological Sucession of the Neves-Corvo Mine Area. *Mineralium Deposita*, 39: 422-436.
- Pacheco N, Ferreira A, Noiva P, Barriga G (2003) The usual surprise called Neves-Corvo, em Kelly, J.G., Andrew, C.J., Ashton, J.H., Boland, M.B., Earls, G., Fuscuardi, L., and Stanley, G., eds., *Europe's major base metal deposits: Dublin, Ireland, Irish Association for Economic Geology*, p. 391-404.
- Pereira Z, Saez R, Pons JM, Oliveira JT, Moreno C (1996) Edad Devonica (Struniense) de las mineralizaciones de Aznalcóllar (Faja Pirítica Ibérica) en base a palinologia. *Geogaceta*, 20. 1609-1612.
- Peters W (1987) *Exploration and Mining Geology*. John Wiley & Sons, New York, 634p.
- Quental P, Almeida JA, Simões M (2012) Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. *Advances in Water Resources*, 39: 18–32.
- Peters W (1987) *Exploration and Mining Geology*. John Wiley & Sons, New York, 634p.
- Relvas J (2000) *Geology and Metallogeny at the Neves Corvo Deposit, Portugal*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 319 p.
- Relvas J, Barriga F, Pacheco N, Carvalho D (2002) The Neves-Corvo Deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal: Impacts and Future, 25 Years After the Discovery. *Society of Economic Geologists*, 9: 155-176.
- Relvas J (2014) Shallow Sub-seafloor Replacement at the Neves Corvo Deposit. *Comunicações Geológicas* 101 (Especial II): 841-843.
- Relvas J, Tassinari C, Munhá J, Barriga F (2001) Multi-sourced ore-forming fluids in the Neves VHMS deposit of the Iberian pyrite belt (Portugal): Strontium, neodymium and lead isotope evidence. *Mineralium Deposita*, 36, 416-427.
- Ribeiro A (2013) A evolução Geodinâmica de Portugal: os ciclos ante-mesozóicos. *Geologia de Portugal*, Escolar Editora, Vol I, 11-54
- Rossi ME, Deutsch CV (2014) *Mineral Resource Estimation*. Springer, New-York, 326p.
- Schwarz-Schampera U, Herzig PM (2002) *Indium—Geology, mineralogy, and economics: Heidelberg, Germany*, Springer-Verlag, 257 p.

- Silva JB, Ribeiro A, Fonseca P, Oliveira J, Pereira Z, Fernandes P, Munhá, J, Barriga F, Relvas J, Carvalho P, Ferreira A, Beliz A, Noiva P, Pacheco N, Leitão JÁ (1997) Tectonostratigraphic overview of Neves-Corvo mine in the context of the Variscan orogeny. Society of Economic Geologists, Neves-Corvo Field Conference, Lisboa. p88.
- Soares A (2001) Direct Sequential Simulation and Cosimulation, *Mathematical Geology*, 33(8): 911–926.
- Soares A (2006) *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. IST Press, 2ª edição, Lisboa, 211p.
- Srivastava R (2005) Probabilistic Modeling of Ore Lens Geometry: An Alternative to deterministic Wireframes. *Mathematical Geology*, 37: 513–544.
- Tornos F (2006) Environment of Formation and Styles of Volcanogenic Massive Sulfides: The Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 28(3): 259-307.